Facultad
de Ciencias Ambientales

Teoría General de Sistemas. Conceptos y aplicaciones.

Carlos Alberto Ossa O.

Colección Textos Académicos

Carlos Alberto Ossa O. (Pereira, Risaralda, Colombia, 1943). Ingeniero Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira, postgrado en “Ingenieur Civil en Gestion Industrielle” de la Universidad Católica de Lovaina. Profesor titular (pensionado) adscrito a la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, Ex - profesor de la Universidad de los Andes (U.L.A.) de Mérida, Venezuela adscrito a la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ing. de Sistemas.

Actualmente es docente catedrático de la Facultad de Ciencias Ambientales y docente del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales de la Universidad del Cauca, Universidad del Valle y Universidad Tecnológica de Pereira.

Autor de los libros: *Álgebra lineal y programación lineal* (2002), *Simulación básica* (2002) y *Teoría General de Sistemas, fundamentos* (2004).

Ha publicado artículos en revistas nacionales y extranjeras.

Asesor empresarial. Se ha desempeñado como decano de la facultad de Ingeniería Industrial (F.I.I.) de la Universidad Tecnológica de Pereira, director del Departamento de I. de O. y Estadística de la EISULA, director del Departamento de Postgrados de la F.I.I. y de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, Gerente de producción de “Transformadores Magom” y Rector de la Universidad Tecnológica de Pereira.

caossa@utp.edu.co

Teoría General de Sistemas

Conceptos y aplicaciones

Carlos Alberto Ossa O.

Colección Textos Académicos
Facultad Ciencias Ambientales
2017

Ossa O. Carlos Alberto

Teoría General de Sistemas: Conceptos y aplicaciones / Carlos Alberto Ossa O.—Pereira :
Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.

584 p.: il
(Colección Textos académicos).

ISBN 978-958-722-228-9

1. Análisis de sistemas 2. Teoría de sistemas 3. Teoría del caos 4. Mecánica cuántica 5.
investigación operacional 6. Diseño de sistemas 7. Ecuaciones matemáticas 8. Dinámica de
sistemas.

620.7 CDD23

©Carlos Alberto Ossa O.

©Universidad Tecnológica de Pereira

Primera edición

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Colombia

Universidad Tecnológica de Pereira

Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

Coordinador editorial:

Luis Miguel Vargas Valencia

luismvargas@utp.edu.co

Tel: 3137381

Edificio 9, Biblioteca Central “Jorge Roa Martínez” 9/N1/110

Cra. 27 N° 10-02 Los Álamos

Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Montaje y producción:

Carlos Alberto Ossa O.

Recursos Informáticos y Educativos

Universidad Tecnológica de Pereira

Ilustración Cubierta:

Recursos Informáticos y Educativos y José Camilo Ríos Gaviria

Impresión y acabados:

Publprint S.A.S.

Todos los derechos reservados.

*a Salvador y Chava:
Vida y principios.*

*a María Liliana Herrera:
inspiración, soporte y guía.*

Tabla de contenido

Prefacio	15
----------	----

CAPÍTULO 1

CONCEPTO DE CIENCIA

1.0 La Teoría General de Sistemas	19
1.1 Hablemos de ciencia	21
1.1.1 Formas de conocimiento	22
1.1.2 Objeto y objetividad	25
1.1.3 Método	30
1.1.3.1 Inducción. Deducción	33
1.1.3.2 El silogismo	34
1.1.3.3 La experimentación	36
1.2 Pensamiento lineal y sistémico	42
1.3 Ciencia privada. Ciencia pública	45
1.4. Resumen	49

CAPÍTULO 2

LA CIENCIA COMO SISTEMA FORMAL

2.0 El concepto de formalización	51
2.1 La formalización de la matemática	51
2.1.1 Depuración del lenguaje matemático	55
2.2 La formalización en la ciencia	55
2.2.1 Ejemplo en biología: leyes de la herencia	62
2.2.2 Ejemplos en las ciencias humanas	67
2.3 Una clasificación de las ciencias	69
2.4 ¿Qué entendemos, entonces, por ciencia?	74
2.4.1 La ciencia en K. Popper	74
2.4.2 Los conceptos de T. Kuhn	79
2.4.3 P. K. Feyerabend y el método	80
2.5 Consideraciones finales	82
2.6 Resumen	83

CAPÍTULO 3

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

3.0 Aislamiento. Reduccionismo	85
3.0.1 El concepto de modelo	89
3.1 Mecanicismo	90
3.2 Holismo	95
3.3 El enfoque de sistemas	99
3.4 El concepto de sistema	105
3.5 Isomorfismo	110
3.6 Tipos de sistemas	111
3.7 Patrón, estructura y proceso	114
3.8 Ciencia, tecnología, filosofía de sistemas	116
3.9 Resumen	118

CAPÍTULO 4

LEYES DE LOS SISTEMAS

4.0 El concepto de ley	121
4.1 Leyes sistémicas	124
4.1.1. Equifinalidad	124
4.1.2 Centralización (integración)	125
4.1.3 Descentralización (mecanización)	125
4.1.4 Mecanización-centralización	126
4.1.5 Entropía mínima	126
4.1.6 Variedad obligada	127
4.1.7 Emergencia sistémica	130
4.1.8 Jerarquización	132
4.1.9 Acoplamiento	133
4.1.10 Totalidad	134
4.2 Complejidad y reductibilidad sistémica	136
4.3 Sistema retroalimentado	143
4.4 Resumen	148

CAPÍTULO 5

FORMALIZACIÓN DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

5.0 Formalización y clasificación	149
5.1 Clasificación de los sistemas	150
5.1.1 Clasificación de los sistemas: Keneth Boulding	150
5.1.2 Russell L. Ackoff: clasificación según el comportamiento	154
5.1.2.1 Clasificación de acuerdo al comportamiento del sistema	155
5.1.2.2 Clasificación organizacional	158
5.1.3 Clasificación de P. B. Checkland	161
5.2 Las leyes numéricas	166
5.3 Hipótesis de la T.G.S	172
5.3.1 La propuesta de L. V. Bertalanffy	173
5.3.2 La propuesta de O. Lange	177
5.3.3 Jerarquización, casi-descomponibilidad	181
5.4 Resumen	184

CAPÍTULO 6

MATEMÁTICAS DE LA T.G.S.

6.0 Nuevos conceptos, nuevas matemáticas	187
6.1 Termodinámica irreversible	188
6.1.1 Estructuras disipativas	197
6.1.2 Entropía y teoría cuántica	199
6.1.3 Información y entropía	201
6.2 Teoría de conjuntos difusos	206
6.3 Hacia una lógica sistémica	212
6.4 Resumen	215

CAPÍTULO 7.

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD INICIOS

7.0 Ideas generales	217
7.1 Teoría del caos	224
7.2 Teoría de fractales	234
7.3 Teoría de catástrofes.	238
7.4 La mecánica cuántica	245
7.5 Resumen	251

CAPÍTULO 8

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD

NUEVAS PERSPECTIVAS

8.0 Las nuevas teorías	255
8.1 Teoría de la “Multitud-antimultitud”	257
8.2 Autómatas celulares	261
8.3 Teoría de Grafos	264
8.3.1 La ley $1/f^n$	269
8.3.2 Las ideas de Kauffman	273
8.3.3 Mundos pequeños (Small Worlds)	279
8.4. Características básicas de los sistemas complejos	282
8.5. Complejidad y sistemas sociales. Administración	284
8.5.1 Organizaciones	289
8.6 Resumen	296

CAPÍTULO 9

METODOLOGÍAS. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

9.0 Metodología, método, técnica	299
9.1 Tipos de investigación	303
9.2 Principios básicos de una metodología sistémica	306
9.3 Características generales de los cuatro tipos de metodologías según Jackson	308
9.3.1 Metodologías funcionalistas	310
9.3.2 Metodologías interpretativas	311
9.3.3 Metodologías emancipadoras	313
9.3.4 Metodologías postmodernas	314
9.4 Las ideas de C. W. Churchman	316
9.4.1 Los objetivos del sistema	318
9.4.2 Medidas de actuación	319
9.4.3 Ambiente del sistema	319
9.4.4 Los recursos del sistema	320
9.4.5 Los subsistemas	321
9.4.6 La administración del sistema	323
9.5 A guisa de ejemplo	324
9.6 El proyecto metodológico	326
9.7 Resumen	328

CAPÍTULO 10

METODOLOGÍAS DURAS

10.0 Tres metodologías funcionalistas	331
10.1 La programación lineal	331
10.2 La metodología de G.M. Jenkins	337
10.2.1 Las fases de la metodología	338
10.2.2 Análisis del sistema	340
10.2.3 Diseño del sistema (síntesis)	343
10.2.4 Realización	344
10.2.5 Operación	345
10.3 La Dinámica de Sistemas de J.W. Forrester	346
10.3.1 Causalidad	347
10.3.2 Lazo de retroalimentación	349
10.3.3 Niveles	351
10.3.4 Flujos	352
10.3.4.1 Variables auxiliares. Parámetros	353
10.3.5 Flujos, niveles y lazos de retroalimentación	354
10.3.6 Ecuaciones matemáticas	356
10.4 Resumen	361

CAPÍTULO 11

METODOLOGÍAS BLANDAS.

LA METODOLOGÍA DE P. B. CHECKLAND

11.0 Antecedentes de la metodología	363
11.1. El "qué" y el "cómo"	363
11.1.1 Generalidades	364
11.1.2 Fundamentos	365
11.1.3 El proceso metodológico	370
11.1.4 La corriente de la investigación basada en la lógica	374
11.1.4.1 Tareas primarias	374
11.1.4.2. Definición raíz	375
11.1.4.3 Modelo conceptual	379
11.1.4.4 Comparación	379
11.1.5 La corriente de investigación basada en la cultura	380
11.1.5.1 Dibujo enriquecido	381
11.1.5.2 Análisis de la intervención (roles)	382
11.1.5.3. Análisis del "Sistema Social"	384

11.1.5.4 Análisis del “sistema político”	385
11.1.6 Cambios factibles y deseables	387
11.1.7 Algunas consideraciones adicionales	388
11.2 Un ejemplo	389
11.3. Resumen.	394

CAPÍTULO 12

METODOLOGÍAS BLANDAS.

DINÁMICA DE SISTEMAS BLANDOS

12.0 La Dinámica de Sistemas Blandos	395
12.1 Retroalimentación. Demoras Arquetipos sistémicos	397
12.1.1 Límites del crecimiento	403
12.1.2 Desplazamiento de la carga	406
12.1.3 Erosión de metas	409
12.1.4 Soluciones contraproducentes	411
12.1.5 Escalada	413
12.1.6 Éxito para quien tiene éxito	415
12.1.7 Tragedia del terreno común	416
12.1.8 Crecimiento y subinversión	418
12.2 Resumen	420

CAPÍTULO 13

¿ENFOQUE ANALÍTICO?

¿ENFOQUE SISTÉMICO?

13.0 Diferencias entre las Ciencias Naturales y las Humanas	421
13.1. Bosque industrial	423
13.2 Resumen	435

CAPÍTULO 14

CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SISTEMAS

14.0 ¿Son necesarias las críticas?	437
14.1 Las críticas de D.C. Phillips	437
14.1.1 Críticas a la filosofía de sistemas	438
14.1.1.1 Todos y partes	438
14.1.1.2 Jerarquización	439

14.1.1.3 Emergencia sistémica	440
14.1.2 Críticas al concepto de sistema	441
14.1.3 Debilidad de los ataques al reduccionismo	443
14.1.4 Crítica al carácter científico de la Teoría de Sistemas	444
14.2 Las críticas de Gall	445
14.2.1 La sistemática y sus teoremas sistémicos	446
14.3 Resumen	453
14.4 “Coda”	453

APÉNDICE CAPÍTULO 1

A.1.1 Empirismo y racionalismo	457
A.1.2 Kant. Revolución copernicana del conocimiento	459
A.1.3 El experimento de Torricelli	461
A.1.4 Tipos de razonamiento	465
A.1.5 Experimentos mentales	468
A.1.6 El principio de causalidad	469

APÉNDICE CAPÍTULO 2

A.2.1 Sistema axiomático de Peano	473
A.2.2 Euclides, Riemann y Lobachevski	474

APÉNDICE CAPÍTULO 3

A.3.1 No direccionalidad del tiempo en Newton	479
A.3.2 Análisis matemático de la ley de los graves de Aristóteles	480
A.3.3 Otro ejemplo de isomorfismo	482

APÉNDICE CAPÍTULO 4

A.4.1 Colisión entre dos esferas	485
A.4.2 Deducción de la ley de la caída libre	486
A.4.3 Termostato	487
A.4.4 Taxonomía. Sistema de Linneo	488
A.4.5 Diagramas de proceso	490

APÉNDICE CAPÍTULO 5

A.5.1 Diversos tipos de sistemas (Ackoff)	493
A.5.2 Leyes sistémicas y Ecuaciones diferenciales	495
A.5.2.1 Totalidad	497
A.5.2.2 Segregación (mecanización) progresiva.	497
A.5.2.3 Centralización	498
A.5.2.4 Jerarquización	499
A.5.2.5 Sistema cerrado, abierto, autoorganización, equifinalidad	500
A.5.3 La propuesta de O. Lange	501

APÉNDICE CAPÍTULO 6

A.6.1 Tipos de energía y sus transformaciones	505
A.6.2 Ley de Fourier: propagación del calor	508
A.6.3 Termodinámica reversible	510
A.6.4 El ciclo de Carnot	511
A.6.5 Entropía e irreversibilidad	514
A.6.6 Cálculo del máximo valor de la entropía	516
A.6.7 ¿El mundo es ordenado o desordenado?	517
A.6.8. Algunas ideas adicionales sobre conjuntos difusos	520

APÉNDICE CAPÍTULO 7

A.7.1 Complementos a la Teoría del caos	525
A.7.2 Sissa, Fibonacci y el crecimiento exponencial	527
A.7.3 Ecuación poblacional renormalizada	533
A.7.4 Dimensión fractal	534
A.7.5 ¿Onda? ¿Partícula?	538
A.7.6 Small Worlds	542
 Bibliografía	 549
 Índice	 561

Prefacio

(Edición revisada)

Este libro tiene su génesis en uno anterior de título “Teoría General de Sistemas. Fundamentos”. La estructura original se ha conservado, aunque se ha aumentado el número de capítulos y se ha adicionado un apéndice con la intención de profundizar algunos temas más allá del objetivo fundamental.

En el año 2009 se inicia un doctorado conjunto en Ciencias Ambientales entre las Universidades del Cauca, Valle y la Tecnológica de Pereira. He tenido el honor de formar parte del grupo de docentes en el módulo de “Teoría General de Sistemas”. Esta oportunidad me abrió un nuevo panorama al conocer profesores de la talla de Apolinar Figueroa C., Gabriel Conde A., Jairo Roldán Ch., Enrique Peña S., los cuales aportaron nuevas inquietudes a mi formación académica.

Este es un libro texto y no pretende otra cosa. Está dirigido especialmente a los estudiantes que deban cursar, en su currículo tanto de pregrado como de postgrado, temas relacionados con la Teoría General de Sistemas (abreviaremos T.G.S.). Trata de estar al tanto de los últimos desarrollos en el campo, aunque no es una visión exhaustiva del mismo. Con respecto a su predecesor, se amplió sensiblemente el tema de la “Teoría de la Complejidad”. Se han añadido nuevos ejemplos, especialmente de campos diferentes a los de la física.

El texto consta de catorce capítulos. El primero está relacionado con una discusión inicial sobre el concepto de ciencia.

El segundo capítulo se inicia con la formalización del conocimiento científico a partir de la formalización de la matemática. Incluye, además, discusiones filosóficas sobre el tema de la ciencia desde las perspectivas de Popper, Kuhn y Feyerabend.

El tercer capítulo se relaciona con el enfoque de sistemas. En él se establece un paralelo de este enfoque con el pensamiento clásico de la ciencia, enfatizando que no se trata de una oposición sino de un complemento que nos permite conocer el mundo que nos rodea de una manera diferente.

El cuarto capítulo gira en torno al concepto de ley y de las leyes de los sistemas. Se introduce someramente el tema de la complejidad, el cual será discutido en los capítulos séptimo y octavo. Termina con una diferenciación entre los sistemas de retroalimentación utilizados en la cibernética, y los sistemas abiertos.

En el capítulo quinto se estudia el tema de la formalización de la T.G.S. Se ejemplifica con dos propuestas: una, de Bertalanffy, basada en un sistema de ecuaciones diferenciales, y otra, de Oskar Lange, soportada por una visión cibernética de los sistemas. No se trata de demostrar que existe *una* teoría matemática de los sistemas sino de mostrar que sí es posible tal teorización, condición fundamental para que un conocimiento pueda formar parte del saber científico. No se pretende decir que son las únicas, ni tampoco las mejores.

El capítulo sexto se refiere a la matemática de los sistemas. Se muestra cómo teorías de diversas corrientes han alimentado a la T.G.S.: la termodinámica, la teoría cuántica, la Teoría de la Información, la teoría de conjuntos difusos...

El capítulo séptimo se ocupa de las primeras teorías de la complejidad. Aunque inicialmente fueron desarrolladas para ocuparse de problemas concretos, rápidamente los investigadores notaron que su espectro podía ampliarse hacia un tratamiento matemático de la complejidad.

En el capítulo octavo se estudian las nuevas perspectivas de la Teoría de la Complejidad y sus aplicaciones en los sistemas sociales y particularmente en la administración.

Hasta aquí podemos decir que se trata de los aspectos teóricos relacionados con los sistemas. Los capítulos que siguen buscan indagar la aplicación, en la práctica, de estas ideas.

El capítulo noveno estudia el concepto de metodología. Indica la importancia que las metodologías tienen cuando, por razones de falta de conocimiento, no disponemos de teorías formales que nos permitan enfrentar situaciones complejas del mundo real. Se establecen las diferencias entre metodología, método y técnica, diferencias que a veces no son claras y llevan a discusiones entre especialistas que, a menudo, traen al estudioso confusiones innecesarias para obtener un buen resultado en la práctica del enfoque de sistemas. Se utiliza la clasificación dura-blanda para diferenciar los tipos de metodologías que tienen que ver con una visión sistémica afín al pensamiento clásico de la ciencia, de aquellas en las cuales este pensamiento no es una buena guía metodológica.

El capítulo décimo presenta tres metodologías sistémicas “duras”: La programación lineal, la metodología de G.M. Jenkins (las cuatro Ms) y la metodología de J. W. Forrester. Estas metodologías se destacan por su importancia en la práctica y por los resultados positivos que han demostrado tener cuando se han aplicado bajo las condiciones para las cuales han sido propuestas.

El capítulo decimoprimerο ilustra una metodología “blanda”: la *Metodología de Sistemas Blandos* (MSB) de P. B. Checkland, una metodología de mucha utilidad para estudiar y mejorar sistemas de la actividad humana.

El capitulo doce trata del enfoque de P. Senge presentado en su libro: *La quinta disciplina*, que podríamos considerar como una *Dinámica de Sistemas blandos*: se trata de la metodología de Forrester aplicada a los problemas de la administración.

El decimotercer capítulo muestra un ejemplo en el cual se hace necesaria una visión tanto reduccionista como sistémica. Mediante el análisis de la administración de un pequeño bosque para obtener madera en forma industrial y programada, se resaltan las características que ambos tipos de enfoque poseen para enfrentar situaciones complejas.

El último capítulo, el decimocuarto, es un vistazo a las críticas que se le han hecho a la Teoría General de Sistemas. Es un capítulo que se hace necesario incluir por honradez académica. El lector podrá sacar sus propias conclusiones.

Los libros que aparecen en la bibliografía fueron los consultados para la elaboración de esta obra. Sin embargo, se incluye una lista de revistas especializadas que aunque no fueron directamente utilizadas para las citas de este texto, desarrollan temas relacionados con el mismo. Evidentemente no es exhaustiva.

Para facilitar las referencias, los números de las figuras se inician con el del capítulo en que se encuentran (por ejemplo la figura 5.2 se encuentra en el capítulo 5). Situación igual ocurre para los numerales (el numeral 5.1.2.1 se encuentra en el capítulo 5) Las referencias que se refieren a los diferentes apéndices empiezan con la letra A y el número del apéndice correspondiente (por ejemplo A.7.5 corresponde al apéndice A.7).

Debo agradecer (de nuevo) a la persona que logró que este proyecto se llevara a cabo: María Liliana Herrera A. No sólo su interés en que el texto se reescribiera sino sus correcciones conceptuales e idiomáticas, y largas horas de conversación sobre estos temas fueron las motivaciones que permitieron que la obra viera la luz.

Sin duda, los estudiantes interesados que he tenido en mis diversos cursos sobre T.G.S. son otra de las causas fundamentales de este trabajo. Ver alumnos que no sólo están entusiasmados con estas ideas sino que, además, generan conocimiento me obligan a tratar de dar lo mejor de mí y dejar, de alguna manera, consignada tan especial experiencia.

Dos pares académicos, cuyos nombres desconozco, hicieron una evaluación del texto. Sus sugerencias fueron de gran importancia, particularmente las de uno de ellos. Lástima que las reglas del juego hacen que para mí queden en el anonimato. El Doctor Carlos Eduardo Maldonado también debe ser mencionado. Desde que conoció que esta obra se estaba escribiendo, siempre tuvo palabras de aliento para que la culminara.

Finalmente, y no menos importante, agradezco la revisión general que le hizo al texto el PhD Tito Morales P., profesor de la Facultad de Ciencias Ambientales de la U.T.P. y al PhD Juan Mauricio Castaño R., docente también de esta facultad, quien tomó en sus riendas las acciones pertinentes para que este texto fuera publicado.

En esta edición se han corregido varios errores que aparecieron en la publicación impresa. De todas formas los errores que aún persistan, bien sea de forma o de concepto, son responsabilidad única del autor.

Carlos Alberto Ossa O.

Sept. 2016.

CAPÍTULO 1

CONCEPTO DE CIENCIA

1.0 La Teoría General de Sistemas

La palabra sistema es de uso corriente: hablamos del “sistema nervioso”, del “sistema planetario”, del “sistema económico”; en la línea de espera nos dicen: “disculpen, se nos cayó el sistema”.

¿Qué significa esta palabra? ¿Acaso merece un estudio especial, tal como este libro lo sugiere en su título?

En física es común el uso de este concepto. Un ejemplo puede ser el péndulo de Galileo: una masa que pende de un hilo de longitud l inextensible y sin peso, y la cual es separada de su posición de reposo, un pequeño ángulo α .

Péndulo de Galileo aislado del resto del universo

Fig. 1.1

Aplicando las leyes de Newton podemos escribir:

$$d^2 \alpha / dt^2 + g \alpha / l = 0 \quad (1-1)$$

Cuya solución es:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (1-2)$$

Podríamos ahora preguntarnos: ¿Qué es un péndulo de Galileo? ¿Posee leyes que lo rigen? ¿Puedo decir que es un sistema? ¿Qué lo caracteriza como sistema? ¿Qué ventajas tiene mirarlo desde esta perspectiva? ¿El resto del universo, es parte de este sistema? ¿También el universo es un sistema? Si esto es así, entonces ¿existen sistemas dentro de sistemas? ¿Existe entre ellos alguna relación? ¿Es posible construir modelos de estos sistemas? ¿Podemos manipular estos modelos y predecir comportamientos? ¿Podemos, respecto a estos sistemas, solucionar las situaciones anómalas que se presenten? ¿Afectan al ambiente? ¿Es inevitable esta afectación?

Sin entrar en detalles técnicos, y dependiendo del conocimiento que el lector tenga de física, es evidente que estas preguntas tienen respuestas muy precisas.

Veamos otro ejemplo. Consideremos una familia: un padre, una madre y dos hijos. Podríamos preguntarnos de nuevo: ¿Qué podemos entender por “una familia”? ¿Posee leyes que la rigen? ¿Puedo decir que ella es un sistema? ¿Qué la caracteriza como sistema? ¿Qué ventajas tiene mirarla desde esta perspectiva? ¿Está incluida en otro concepto social (otro sistema)? Si esto es así, entonces ¿existen sistemas dentro de sistemas? ¿Existe entre ellos alguna relación? ¿Es posible construir modelos de estos sistemas? ¿Podemos manipular estos modelos y predecir comportamientos? ¿Podemos, respecto a estos sistemas, solucionar las situaciones anómalas que se presenten? ¿Afectan al ambiente? ¿Es inevitable esta afectación?

Según los sociólogos existen diferentes tipos de familia: nuclear, extensa, monoparental, homoparental. Hay, pues, múltiples formas de considerar lo que es una familia, lo que no ocurre con el péndulo de Galileo: él es descrito, de forma unánime, de acuerdo con la figura 1.1.

Este texto trata sobre una nueva forma, un nuevo enfoque de ver el mundo; el enfoque de sistemas y la teoría que lo soporta: la *Teoría General de Sistemas*. Intentaremos indicar cómo a través de él y con la ayuda de la ciencia tradicional, podemos dar respuestas a las preguntas anteriores, especialmente para cierto tipo de sistemas en los cuales las respuestas no son tan evidentes como sí lo pueden ser en el caso del péndulo antes indicado.

A manera de una somera introducción al tema, diremos que la Teoría General de Sistemas es una amalgama de conocimientos que trata de la consideración global de los fenómenos que estudia, por contraposición al estudio de las partes para comprender el todo, que es la forma como la ciencia tradicional nos ha enseñado a desarrollar el conocimiento. La deducción de la ecuación (1-1) se basa en la ley de la conservación de la energía, en este caso, la combinación (suma) de las energías cinética y potencial del péndulo durante su movimiento¹. La descripción del sistema total (la ecuación) es la suma de las afectaciones de cada una de las partes. Para poder aclarar estas dos maneras de pensar, es necesario analizar en detalle el concepto de ciencia. En esta primera parte, al utilizar la palabra sistema, nos referiremos al uso que se le da en el lenguaje corriente. Una discusión más profunda de este tema y otros conceptos con ella relacionados se dará en el capítulo 2.

1.1 Hablemos de ciencia

Aunque en muchos textos se pueden encontrar varias definiciones de ciencia (por ejemplo: “ciencia es aquello que posee método propio”, o “ciencia es el conjunto de conocimientos adquiridos a través del método científico”), es curioso que los mismos científicos se cuiden de ofrecer una definición. Desafortunadamente, la prolijidad de libros-texto sobre lo que es ciencia, investigación y método científico, ha provocado en los estudiantes extraños y diversos sentimientos respecto a este tipo de conocimiento haciéndolo ver, de un lado, como algo fantástico y fundado en fórmulas matemáticas de las cuales se obtienen nuevas fórmulas o modelos que permiten explicar todos los fenómenos de la realidad natural y humana. De otro lado, el término ciencia es usado indiscriminadamente para dar credibilidad tanto a una serie de pseudoteorías como a una infinidad de productos comerciales o, en su defecto, es usado como un recetario mágico de pasos a seguir gracias al cual nos podemos convertir en investigadores científicos. Estas son algunas de las razones por las cuales el concepto ha perdido en el lenguaje de la vida diaria el significado real que a través de la historia ha ido adquiriendo. Es importante resaltar que aunque la definición definitiva no está dada, sí existen nociones y criterios que permiten establecer qué es un conocimiento científico y qué no lo es. Algunos

1. Por energía entenderemos la capacidad para realizar trabajo. Trabajo es, por definición, fuerza $\times$ distancia.

de estos criterios son: conocimiento, tipos de conocimiento, objeto, objetividad, fenómeno, método, experimento, formalización y clasificación de las ciencias. Considerémoslos con cierto detalle.

1.1.1 Formas de conocimiento

Entenderemos por *conocer* lo que ocurre cuando un *sujeto* aprehende un *objeto*. Esto implica la separación, por lo menos en principio, del sujeto y del objeto.

Siguiendo a Priante (2006), quien resume magistralmente a Kant, diremos que percibimos las cosas a través de los sentidos: las vemos, las palpamos, las olemos, las gustamos, las oímos. Podemos describir sus formas, colores, texturas, olores, sabores, sonidos. También su situación en el espacio y las relaciones de unas con otras, lo cual nos lleva a concluir, por sentido común, que ellas existen *per se*, con independencia de si las veo o no. Pero el sentido común nos ha engañado muchas veces. La tierra no es plana, como se creía; el sol no gira alrededor de ella como se aseguraba en la Antigüedad; los sólidos son sólo aparentes, ya que existe más vacío que materia entre sus átomos.

Analicemos el caso de la vista por ser el sentido más importante según la ciencia moderna, aunque un análisis equivalente podría hacerse para los demás.

“Yo veo” parte del hecho de que la luz es reflejada por el objeto y pasa a través del ojo, que se asimila a una lente y llega a la retina, en donde se forma una imagen invertida del objeto. De allí esta imagen es transmitida, mediante impulsos eléctricos y bioquímicos a través del nervio óptico al cerebro, en donde se procesa, clasifica, ordena y memoriza; entonces, conocemos. Lo que llega a la retina es, pues, una sensación (una percepción) “que se supone que se origina en una realidad externa”; decimos que “se supone una realidad externa” ya que la única realidad que podemos asegurar es la de nuestra propia sensación en el aparato ocular. Esta sensación (información), es “caótica, sin significado” (puntos luminosos, impulsos eléctricos y nada más). Dada la limitación de nuestros sentidos la idea que nos formamos del mundo exterior es incompleta.

Los principios que rigen la forma en que el cerebro opera son: *el tiempo, el espacio y la causalidad*. Estos tres principios son instrumentos de conocimiento y “en ningún caso pueden ser objeto de conocimiento en cuanto a sus límites”. “El cerebro no puede no aplicarlos, ni puede entender algo que no encaje en esas formas”. Es un programa con el que venimos al mundo y sin él,

el mundo sería ininteligible. Estos principios no se encuentran en el mundo de las *cosas-en-sí* (aquellas cosas inaccesibles a nuestros sentidos), sino que forma parte de nuestro aparato cognitivo: el espacio intuye el mundo exterior, mientras que el tiempo ordena el mundo interior de nuestros pensamientos. Son conocimientos a priori².

Ahora bien, hay muchas maneras de aprehender el objeto (es decir, de conocerlo, quererlo, sentirlo, interiorizarlo, etc.); de ahí que existan varios *tipos de conocimiento*³. Debemos advertir que el tema *conocimiento* exigiría una delimitación del concepto, una visión desde su aplicación (teóricas, prácticas), un enfoque desde su estructura (formal, material, axiomático), una perspectiva desde su divulgación (público, privado, explícito, tácito o implícito, codificado), una descripción desde su origen (analítico, sintético, empírico), de su finalidad (científico, comunicativo, expresivo), de su soporte (conservación y divulgación: cultural, bibliográfico, artístico, informativo), de su forma de adquisición (Académico, tradicional, vulgar, religioso), de su generación formal (investigación básica, investigación aplicada, libros científicos, divulgación), o de sus vías de acceso, que es lo que tendremos en cuenta en lo que sigue.

- *Conocimiento o saber intuitivo*: es el conocimiento que se tiene como directo e inmediato del objeto conocido. No suele basarse en la confirmación empírica, ni sigue un camino racional para su construcción y formulación; surge de la facultad que todos tenemos para juzgar razonablemente las cosas. Por ello no puede explicarse o, incluso, verbalizarse. Obviamente, este tipo de conocimiento es totalmente subjetivo ya que la verdad de lo inferido es responsabilidad del observador. Esto lleva a lo que se conoce como realismo ingenuo, es decir, creer que los objetos, los fenómenos, las situaciones, en general, lo que llamamos “realidad” es tal como aparece. Así las cosas, la opinión puede ser verdadera o no serlo. Aseguramos que Pedro es el mejor amigo del mundo, que en cierta región la gente es de mal genio o que la familia a la cual no hemos referido no es agradable.
- *Conocimiento por la experiencia*: Puede obtenerse por contacto, presencia directa o intuición. Su referencia y fundamento, en último término, es el testimonio directo o indirecto (a través de aparatos) de la percepción de los sentidos. Es el típico ejemplo del niño que se quema la primera vez que toca una vela, pero difícilmente volverá a hacerlo conscientemente.

2. Remitimos al lector al APÉNDICE, literal A.1.1.

3. Lo que sigue está fundamentado en el artículo de Wikipedia: conocimiento (<http://es.wikipedia.org/wiki/Conocimiento>).

- *Conocimiento por tradición o mediato*: Por lo general, se trata de un conocimiento por descripción y, como su nombre lo indica, se encuentra mediado por la tradición escrita, oral, o por experiencia indirecta (aunque este tipo de conocimiento puede dar lugar a un conocimiento fundado e incluso científico). La historia es un claro ejemplo. Lo que conocemos sobre los griegos, ha sido relatado por otros. También: sabemos que existe la muralla China, así nunca hayamos estado en ella. Este conocimiento es “mediado”. Podemos incluir aquí el conocimiento por autoridad: estatus moral, científico, político, artístico...
- *Conocimiento científico*: de manera provisional digamos que el conocimiento científico es aquel que es racional (por oposición a lo mítico, a lo irracional, etc.), metódico (en el sentido de que no es especulativo), experimental (que es comprobable en la práctica), falible (que se puede corregir, ampliar y perfeccionar) y, finalmente, que puede predecir ciertos acontecimientos. Pero antes de desarrollar este tema es necesario hacer primero ciertas aclaraciones.

¿Existen algunos *procesos* que permitan generar un conocimiento confiable? Se destacan *el análisis y la síntesis, la inducción y la deducción*. Con respecto al análisis y la síntesis podemos decir que son dos actividades mentales que se presentan simultáneamente en los procesos cognoscitivos. En términos amplios, el análisis tiene que ver con la descomposición del objeto, fenómeno o situación en las partes que lo conforman, pues conociendo el funcionamiento de las partes se conocerá el del todo. Ellas deben luego recomponerse, y este proceso tiene por nombre síntesis. Así, podríamos intentar un conocimiento de la familia en cuestión mediante la observación de sus partes: el padre, la madre, cada uno de los hijos, ¿La casa?, ¿Sus amigos?... Es decir, analizamos esta familia. Luego intentamos sintetizar todos estos conocimientos en una idea de lo que dicha familia es. Igual podríamos hacerlo con el ejemplo del péndulo⁴.

Con respecto a la inducción (de observaciones particulares repetidas, infiero conclusiones generales) y la deducción (de una observación general, obtengo conclusiones particulares) podemos adelantar aquí que son otra manera de abordar los fenómenos y que se encuentran íntimamente relacionadas con las dos anteriores. Mas, como método, todas ellas tienen sus limitaciones. Para ampliar un poco el tema del conocimiento remitimos al lector al APÉNDICE, literal A.1.2.

4. Nótese que para el caso del péndulo no existen dudas de las partes a analizar.

1.1.2 Objeto y objetividad

Este es otro de los criterios a través de los cuales se puede aclarar qué es el conocimiento científico. En el caso de la objetividad, debemos indicar que esta noción no sólo no cuenta con una definición única sino que ha cambiado a través del transcurso de la historia de la filosofía y de la ciencia. Cuando se habla de objetividad se está suponiendo una actitud muy particular por parte del sujeto respecto al otro elemento con el que siempre estará relacionado: el objeto. Pero ¿qué es el objeto? Veamos primero su significación etimológica. Objeto viene de *objectum*, que es el participio pasado del verbo *objicio* que significa “echar hacia delante” o “presentarse a los ojos”. La idea aquí es la de una separación entre el sujeto y el objeto, entre el observador y lo observado.

¿De qué tipo de separación se trata? Como lo habíamos dicho antes, el sujeto no aprehende el objeto como tal, sino que lo aprehende a través de una representación que tiene de él en la conciencia. Ahora bien, la relación sujeto-objeto y la naturaleza de ambos son las dos cuestiones que han creado las grandes discusiones respecto a lo que debe entenderse por conocimiento científico ya que, según muchos tratadistas y filósofos de la ciencia, para que un conocimiento sea científico debe tener por requisito la objetividad. Hablaremos primero de qué es el objeto y, en segundo lugar, de la objetividad y de la subjetividad.

Ante todo, el objeto es aquello que es dado a nuestra conciencia para que sea conocido⁵. Es algo que puede poseer características y relaciones. Esto supone un proceso de “objetivación”, es decir, hacer de lo dado un objeto de conocimiento. Desde la modernidad y, sobre todo, para lo que tiene que ver con la ciencia clásica, se ha entendido el objeto como aquello que no reside en el sujeto, en contraposición a lo “subjetivo”. Por subjetivo habría que entender aquello que está en el sujeto. En resumen: objeto sería todo aquello que puede equipararse a “realidad”, y la realidad puede ser cognoscible o incognoscible. En lo que respecta al conocimiento científico, él debe ocuparse de realidades o fenómenos que sean susceptibles de ser cognoscibles, ya que existen ciertos objetos que no pueden conocerse científicamente, como por ejemplo, los que están relacionados con la religión, la magia, el mito, la mística etc.

5. Obviamente hay muchos “objetos” que aparecen ante nuestra conciencia pero no necesariamente son “objetos de conocimiento”, por ejemplo los recuerdos, los deseos, las fantasías, etc. Por eso, la definición que damos aquí la restringimos exclusivamente al problema del conocimiento y, puntualmente, al del conocimiento científico.

La definición amplia que hemos dado de objeto contiene, por su generalidad, muchas clases de objetos. Así que podemos clasificarlos en tres categorías⁶.

- *Objetos que tienen existencia real*: son aquellos que están sometidos a las condiciones de espacio y tiempo y por ello mismo se encuentran regidos por el principio de causalidad (todo suceso se origina por una causa, origen o principio). Son los objetos y fenómenos físicos referidos al mundo natural. El péndulo es un buen ejemplo. Otro más sutil es la información.
- *Objetos ideales*: son llamados así porque no están sometidos a las condiciones espacio temporales. A esta clase pertenecen los objetos matemáticos y los de la lógica⁷.
- *Objetos cuya naturaleza tiene que ver con la actividad humana*: son los objetos sociales, culturales y morales. Por ejemplo, la gente que conforma la familia, los sistemas de leyes y reglamentos, la economía, la psicología, el arte etc.

Insistiendo en el tema podemos concluir que en el contexto del pensamiento científico el objeto es todo aquello que puede ser susceptible de conocimiento general, repetible y perceptible.

La segunda cuestión planteada es la siguiente: ¿qué es la objetividad? Esta pregunta remite necesariamente a las siguientes: ¿cómo ser objetivo respecto a lo que se está conociendo? ¿Se puede identificar conocimiento objetivo con conocimiento verdadero? Para dar respuesta a algunas de estas preguntas haremos inmediatamente una ilustración sobre dos tipos de relaciones que en la historia del hombre se han establecido entre el sujeto y el objeto.

Pensemos en el hombre primitivo. Estos seres enfrentaban de una manera especial la naturaleza: no podían separarla de su propia existencia por lo que nada de la naturaleza podía ser explicado sin su inclusión. Esto lleva por nombre *animismo*: para el hombre primitivo el mundo no es inanimado; el mundo, sus fenómenos, tienen un alma y una voluntad análogas a las humanas pero más

6. Hay que aclarar que existen muchas clasificaciones y categorías. La que aquí ofrecemos se circunscribe a los objetivos y necesidades del presente texto y tiene un carácter operativo y didáctico.

7. Puede extrañar al estudiante el término “ideal” y no se equivoca, ya que tiene varias acepciones. Puede significar un modelo al cual se aspira; también una realidad inalcanzable, una utopía o algo perfecto en su propia naturaleza. Pero tiene además una significación referida a ciertas entidades como son las de la matemática y la lógica.

potentes, las cuales se manifiestan precisamente por medio de fenómenos como las tormentas, los truenos, las sequías, etc. Así las cosas, la naturaleza era tratada como un “tú” y al enfrentársela, este “tú” revelaba su individualidad, sus cualidades y su voluntad: “A este “tú” no se le contempla sino que se lo experimenta como “vida que se encara a la vida” e implica las facultades del hombre en una relación recíproca. A esta experiencia se encontraban subordinados los pensamientos lo mismo que las acciones y los sentimientos” (H. y H.A. Frankfort *et al.* 1974). Esta manera de encarar el mundo lleva al primitivo a considerarlo como básicamente subjetivo, es decir con carácter humano, y las explicaciones de los sucesos tomarán la forma de mitos⁸. La caída de un rayo, una inundación o el incendio de un bosque obedecían a la reacción de los dioses ante comportamientos que estos seres consideraban que los ofendían.

En la evolución de la civilización, con el surgimiento del pensamiento científico, las explicaciones míticas de los fenómenos naturales fueron reemplazadas por explicaciones más “racionales”. Es decir, el hombre empezó a preguntarse por las causas naturales de los fenómenos. De esta manera, él se separa de la naturaleza en lo que a su explicación se refiere y empieza a tratarla como un “ello”, un “*objectum*” que al estudiarse desde el punto de vista “natural” se mostraba como resultado de “leyes naturales”. Así nació la actitud objetiva frente a la subjetiva y lo que se llama conocimiento objetivo o científico.

La manera, pues, de encarar la naturaleza considerándola como un “*objectum*”, implicó una separación total entre el sujeto y el objeto. Aparentemente, para que un conocimiento fuera verdadero, el sujeto que estuviera conociendo un determinado fenómeno no debía intervenir en él. Debía considerarlo de manera imparcial, sin que su propia subjetividad, es decir, sus sentidos, su ideología, sus sentimientos, sus emociones, afectaran al fenómeno en cuestión. Esta idea de objetividad fue la que caracterizó a la ciencia desde la modernidad hasta principios del siglo XX, época en la que los hombres de ciencia comprendieron que la separación total entre sujeto y objeto no era posible.

Volvamos por un momento a nuestro hombre primitivo. Su manera de conocer era directa, emotiva y no respondía a un método predeterminado, cosa que implicaba un compromiso con el fenómeno, la creación de un vínculo emocional. Esto es fácil de entender aún hoy en la vida cotidiana cuando para descalificar la “opinión” de alguien se la tilda de “subjetiva”, con lo que se indica

8. Nos referimos a los relatos de tradiciones que se refieren a acontecimientos prodigiosos, realizados por seres sobrenaturales o extraordinarios, tales como dioses, semidioses, héroes, monstruos o personajes fantásticos.

que el sujeto no está distanciado emocionalmente del fenómeno; sus propios prejuicios, sentimientos, intereses determinan su análisis o la comprensión del asunto. De ahí resulta que su opinión o las conclusiones a las que ha llegado respecto al fenómeno no serían verdaderas, acertadas o creíbles.

Podríamos esquematizar lo dicho hasta el momento como lo muestra la figura 1.2 (Cfr. APÉNDICE, literal A.1.2).

Fig. 1.2

La característica del conocimiento científico, a partir de la modernidad, radica, según lo anterior, en la separación del sujeto respecto al objeto. El sujeto es “indiferente”, como si no tuviera ninguna relación con el objeto, lo cual permite que él se le ofrezca en su naturaleza y verdad. Esta manera de caracterizar el conocimiento científico implicó la utilización de ciertos métodos que se revelaron insuficientes desde finales del siglo XIX y a los que nos referiremos más adelante. Por el momento podemos decir que los hombres de ciencia de la primera mitad del siglo XX llegaron a la conclusión de que la separación entre el que conoce y lo conocido no era posible. Aunque para muchos la más importante virtud de la ciencia es la “objetividad”, ésta parece ser más bien un ideal, pues el sujeto se encuentra involucrado con el fenómeno a estudiar. En términos de Schrödinger (1975, p. 37):

... Esta obligada renuncia a una descripción puramente objetiva de la naturaleza es considerada hoy por la mayoría como una profunda transformación del concepto físico del mundo. Parece una dolorosa reducción de nuestra aspiración a la verdad y a la claridad, y diríase que nuestros signos y fórmulas –y los cuadros a ellos vinculados– no constituyen un objeto con existencia independiente del observador, sino que tan sólo representan la relación sujeto-objeto. Pero en el fondo, ¿no es esta relación la única verdadera realidad que conocemos? ¿No basta que encuentre una firme, clara e inconfundible expresión en la que se basa toda esperanza? ¿Por qué hemos de prescindir de nosotros mismos?

Una de las causas por las cuales no hay separación tajante sujeto-objeto se basa en la manera que tienen los hombres de conocer, es decir, en sus facultades cognitivas: éstas tienen límites. Así por ejemplo, la naturaleza de nuestros sentidos no nos permite observar todo lo que existe; de ahí que, en primera instancia, el fenómeno no se nos aparezca tal como él es. Nuestro conocimiento estará condicionado por dichos límites y, naturalmente, las conclusiones que se puedan obtener también lo estarán. Una segunda razón son las limitaciones culturales tales como los conocimientos adquiridos, los prejuicios y el mismo idioma. Una tercera razón para que no exista tal separación es la de las limitaciones tecnológicas. Los problemas que se presentan para conocer adecuadamente los fenómenos son en muchas ocasiones producto de la falta de tecnología avanzada. Tal es el caso del conocimiento del universo el cual se amplió sensiblemente con el descubrimiento y perfeccionamiento del telescopio.

De lo anterior debemos concluir, primero, que no es posible una separación entre el sujeto y el objeto tal que se pueda conocer éste último en su totalidad. Segundo, como necesariamente el sujeto se encuentra involucrado con el objeto, la noción de “objetividad” debe cambiar. Dicho de otra manera: si no es posible obtener un conocimiento total y seguro del objeto ¿qué podría caracterizar a un conocimiento como científico? No hay que renunciar a la opción de objetividad; lo que debemos cambiar es nuestra idea de ella. Dijimos más atrás que la objetividad era una actitud que el sujeto asume frente a los fenómenos. Hoy nos vemos obligados a aceptar que una actitud totalmente objetiva no es posible. Lo que sí es posible son las aproximaciones a los fenómenos⁹. Estamos en capacidad de corregir y ampliar nuestros propios conocimientos acerca del

9. Esto nos lleva al tema de la forma en que representamos la realidad: los modelos. El perfeccionamiento del modelo es el que permite incrementar el conocimiento del fenómeno en estudio.

mundo. Según esto, la objetividad consistiría en un proceso de aproximación y corrección cada vez mayor. Esta idea implica también un cambio en la noción de “verdad”: en el conocimiento científico no habría verdad o falsedad, sino aproximaciones a la verdad más adecuadas o correctas que otras. Así lo afirma Capra (1999, p. 61):

Esto se puede ilustrar [...] con un simple experimento que se efectúa frecuentemente en cursos introductorios de física. El profesor deja caer un objeto desde una determinada altura y muestra a sus alumnos con una simple fórmula de física newtoniana cómo calcular el tiempo que tarda el objeto en llegar al suelo. Como en la mayoría de la física newtoniana, los cálculos despreciarán la resistencia del aire y no serán por tanto exactos. Efectivamente, si el objeto fuese una pluma de ave, el experimento simplemente no funcionaría.

El profesor [...] puede avanzar un paso y tomar en consideración la resistencia del aire, introduciendo más datos en la fórmula. El resultado –la segunda aproximación– será más ajustado que el primero, pero no será aún exacto, ya que la resistencia del aire depende de su temperatura y presión. El profesor [...] propondrá una nueva fórmula, mucho más complicada, que tendrá en cuenta estas variables y dará como resultado una tercera aproximación. No obstante, la resistencia del aire depende no sólo de su temperatura y presión, sino también de la convección, es decir, de la circulación de las partículas de aire a gran escala dentro de la habitación. Los alumnos podrán observar que esta convección puede estar influida por una ventana abierta, por sus patrones de respiración, etc. Llegado a este punto, el profesor detendrá probablemente el proceso de mejora de las aproximaciones por pasos sucesivos.

1.1.3 Método

La noción de método es otro de los criterios que pueden orientar una definición de ciencia¹⁰. Hay muchos métodos pero no todos conducen a un conocimiento científico. No es inútil decir que la cuestión del método para obtener conocimiento objetivo no ha sido la misma en las distintas etapas históricas. La concepción de lo que él debe ser en la investigación ha cambiado de acuerdo con las diferentes concepciones sobre el universo y de las limitaciones que tales concepciones han mostrado.

10. El concepto de método se considerará de nuevo en el capítulo 9.

Etimológicamente, método significa disponer de un camino para alcanzar un determinado fin. Respecto al saber científico el método no es “natural”, es decir, es necesario determinarlo a través de las reglas que el investigador va a seguir para alcanzar el fin propuesto: ya sea que se trate de explicar un fenómeno o buscar la solución a un problema. Esto implica dos cosas: primero, la investigación científica parte necesariamente de una situación problemática; el investigador tiene más o menos una idea clara de lo que quiere conseguir y para ello debe “planear” su investigación, debe considerar qué “caminos”, qué métodos, va a seguir. Segundo, el tipo de problema o fenómeno que se trata de solucionar, conocer o explicar determina la estructura del método, lo cual significa que *no existe un método universal* y único para llevar a cabo investigaciones de carácter científico (aunque los textos escolares de “metodología de la investigación” así lo hagan parecer), pues los fenómenos susceptibles de investigación científica son, como se recordará, diferentes. Sin embargo, descubrir un método universal ha sido un ideal en las distintas épocas y tal vez esta sea una de las razones por las cuales se presenten discusiones profundas respecto a los procedimientos utilizados en la ciencia.

En el proceso del conocimiento de la naturaleza nuestro deseo es ir más allá de los hechos observables: deseamos establecer reglas generales, conexiones entre manifestaciones aparentemente aisladas, descubrir nuevos fenómenos no visibles en forma inmediata. Esto se logra mediante el *principio de causalidad*: “todo tiene una causa” o “no hay efecto sin causa”. Este *principio* (Kant supone que es *a priori*) implica que *A* es una causa de *B* sí y sólo sí:

- *A* precede en el tiempo a *B*.
- Que siempre que suceda *A* sucede *B*.
- Y que *A* y *B* estén próximos en el tiempo y en el espacio.

Es importante aclarar que Aristóteles distinguía cuatro tipos de causas. Usaremos como ejemplo una estatua de Sócrates hecha en mármol. La *causa material* (aquello de lo que está hecho algo: el mármol), la *causa formal* (aquello que un objeto es: el filósofo Sócrates), la *causa eficiente* (aquello que ha producido ese algo: el escultor) y la *causa final* (aquello para lo que existe ese algo, a lo cual tiende o puede llegar a ser: el motivo de su existencia: por ejemplo, rendirle tributo al filósofo). Como veremos luego, el énfasis en algunos de estos tipos de causas ha generado diversos enfoques en el estudio de la naturaleza.

Para establecer un panorama general bajo un contexto único el hombre de ciencia establece una *teoría*. Una teoría (científica) es un esquema conceptual integrado que se propone para dar una explicación de ciertas manifestaciones. Para ir corroborando este esquema, generalmente se recurre al experimento. A través de él, las teorías se afinan y surgen nuevas preguntas y nuevos hechos. Este proceso toma un tiempo hasta que es posible proponer un cuerpo de doctrina coherente. Se habla entonces de la teoría de la mecánica clásica, de la teoría de los compuestos químicos, de la teoría del inconsciente, la teoría del estructuralismo en sociología...

Cuando Torricelli lanzó la hipótesis de que el aire ejercía una presión sobre los cuerpos, la experiencia cotidiana parecía indicarnos lo contrario. Sin embargo, un simple experimento puede corroborar esta hipótesis. En efecto, si pesamos en una balanza que funcione correctamente, un globo de caucho o cuero, y luego la llenamos de aire, veremos que en la segunda ocasión el peso será mayor que en la primera, demostrando, de esta manera, que el aire pesa. Este peso del aire ejerce, pues, una fuerza que a su vez es la causa de la presión atmosférica. Torricelli logra explicar el porqué la altura de una columna de mercurio contenida en un tubo cerrado en un extremo y en el cual el extremo abierto está inmerso en una cubeta del mismo elemento, alcanza una altura de 76 cm, altura independiente del diámetro del tubo; o porqué es difícil abrir un recipiente en el cual se ha hecho el vacío¹¹.

Como indicamos antes, el análisis y la síntesis, la inducción y la deducción son procesos básicos para el desarrollo del conocimiento; el investigador puede mezclarlos de acuerdo con las necesidades y exigencias que se vayan dando en el transcurso de la investigación, generando así diversos “métodos de investigación”.

Se podría decir que las características generales del proceder de la ciencia tienen que ver con la observación, la experimentación, la explicación (deducción) y la predicción. Pero son sólo eso, características que no implican propiamente el uso de un método. Esta confusión se aclarará, específicamente, en el capítulo 9.

11. Para ampliar el tema del experimento de Torricelli ver el APÉNDICE literal A.1.3.

1.1.3.1 Inducción. Deducción

Por inducción entenderemos el procedimiento mediante el cual inferimos conclusiones generales a partir de situaciones particulares. Es ir de lo particular a lo general. Por ejemplo, el hecho de observar que todos los días el sol sale por el oriente y se oculta por el occidente y, según consta, ha sido así durante muchos siglos, nos lleva a concluir que el sol sale por el oriente y se oculta por el occidente, y así lo hará mañana. Debe quedar claro, que esta conclusión no tiene un carácter de verdad de la misma fuerza que si demostráramos, a partir de alguna teoría, que esto debe ser así. Para ser más precisos: el hecho de que el sol haya estado saliendo por el oriente desde que la raza humana tiene conciencia, no garantiza que saldrá por el oriente dentro de ocho mil millones de años. De hecho, y de acuerdo con los conocimientos actuales no lo hará pues se habrá extinguido.

Por el contrario, la deducción es un proceso a partir del cual se derivan ciertos enunciados (conclusiones) a partir de otros enunciados (premisas) de un modo puramente formal, es decir, regido por reglas de inferencia: los llamados silogismos. Ellos nos permiten obtener conclusiones particulares a partir de proposiciones generales: es un proceso que nos lleva de lo general a lo particular. La afirmación: los números naturales son infinitos, nos lleva a la conclusión lógica que los números pares (por ser números) son infinitos. Podemos deducir que el sol saldrá mañana por el oriente basándonos en la teoría heliocéntrica de nuestro sistema planetario, y por la forma como los planetas giran alrededor del sol y algunos sobre ellos mismos. Además, en este caso, podemos indicar cuáles son las condiciones para que tal fenómeno se presente diariamente. Pero es necesario notar que, por su misma estructura, el silogismo *no añade ningún conocimiento nuevo*; esto sólo se logra a través de la inducción. Poincaré (1905, p. 2) nos dice:

El razonamiento por silogismos es incapaz de adicionar nada nuevo a los datos que le dan origen; los datos son reducidos a axiomas, y esto es todo lo que podemos encontrar en las conclusiones.

Para que un proceso deductivo pueda llevarse a cabo es necesario la creación de un cálculo: reglas de manipulación de símbolos de tal forma que a cada principio de deducción le corresponda una regla dada. El cálculo garantiza la veracidad de las conclusiones que parten de premisas verdaderas. En el caso de

la matemática, las reglas del cálculo son abstractas y pertenecen al dominio de la lógica simbólica. En las ciencias empíricas, por el contrario, existen aspectos semánticos y sintácticos que deben ser tenidos en cuenta, como veremos mas adelante. Escuchemos a Feynman (2010, p. 61) al respecto:

Me gustaría añadir algunas cosas de carácter algo más general a propósito de la relación entre las matemáticas y la física. A los matemáticos sólo les concierne la estructura del razonamiento, y les traen sin cuidado las cosas de las que están hablando. Ni siquiera les hace falta saber de qué están hablando ni, como ellos mismos afirman, si lo que dicen es cierto. [...]. En otras palabras, los matemáticos preparan razonamientos abstractos usables si se dispone de un conjunto de axiomas sobre el mundo real. Pero para el físico todas sus frases tienen significado. [...] La física no es matemáticas, y las matemáticas no son física. Se ayudan mutuamente, pero en física hay que conocer la conexión de las palabras con el mundo real. Al final es necesario traducir lo hallado al lenguaje coloquial, a los pedazos de cobre y vidrio con los que uno va realizar experimentos. Sólo de esta manera es posible saber si las consecuencias previstas son verdaderas. Ese no es un problema matemático en absoluto.

[...] Es necesario por lo tanto, reducir los teoremas enunciados por los matemáticos para cubrir un amplio abanico de problemas. Eso es muy útil, aunque luego resulta que el pobre físico siempre tiene que volver al matemático y decirle: “Perdóneme, pero aquello que quería usted decirme sobre las cuatro dimensiones...”

1.1.3.2 El silogismo

Un excelente ejemplo de deducción es el silogismo. Un silogismo está compuesto por dos premisas (proposiciones) y una conclusión. Un silogismo clásico es el siguiente:

Premisa 1: *Si todos los hombres son mortales.*

Premisa 2: *y si todos los Europeos son hombres.*

Conclusión: *entonces todos los Europeos son mortales.*

Si admitimos las premisas (*premisa mayor* y *premisa menor*), tenemos que admitir la conclusión. Nada nuevo se ha agregado al conocimiento. Por esta razón Poincaré hace hincapié en la importancia de la inducción (1905, p. 13).

Es más, sostiene que el fundamento de los conceptos matemáticos, el concepto de número y de operaciones aritméticas es inductivo. Su razonamiento esencial parte de que demostrado que un teorema es válido para el número $n-1$, debe ser cierto para n , y como esto sigue así hasta el infinito, no es necesario demostrar infinitos silogismos, sino que (*Op. Cit.* p.10):

[...] razonando por recurrencia, nos confinamos al enunciado del primer silogismo menor, y a la fórmula que contiene como casos particulares todos los silogismos mayores. Esta serie interminable de silogismos es reducida entonces a una frase de pocas líneas.

Poincaré le da una gran trascendencia a la intuición como base del proceso de razonamiento.

Hemos indicado en cursiva algunos elementos del silogismo anterior para llamar la atención sobre un tipo de silogismo, muy citado en la literatura, que no ha respetado la regla aristotélica indicada. Veamos un ejemplo clásico:

Premisa 1: Todos los hombres son mortales.

Premisa 2: Sócrates es un hombre,

Conclusión: entonces Sócrates es mortal.

¿Por qué aceptamos la premisa 1, “todos los hombres son mortales”, como verdadera? Podría ser que en un futuro próximo pudiera existir un hombre inmortal. Para aceptarla pudiéramos adoptar el siguiente procedimiento: usaríamos como premisas evidencias que sean ciertas, y a partir de ellas generalizaríamos la proposición. Podríamos decir, por ejemplo:

Premisa 1': todos los hombres nacidos antes de 1900 han muerto.

Premisa 2': los hombres continúan muriéndose.

Conclusión: “razonablemente” todos los hombres son mortales.

“Razonablemente” significa aquí, una alta probabilidad a favor del hecho. Por otra parte la verdad de estas premisas no implica la verdad de la conclusión.

Pero estos razonamientos son inductivos. La única forma de eliminarlos es con el uso del condicional *si* y el cuantificador *todos*.

Muchas de las inferencias que hacemos en la vida diaria son de tipo inductivo. Muy a menudo, no necesitamos evidencias deductivas. Nos contentamos con aceptar la conclusión como “bien fundada”, como “más probable”. En este tipo

de razonamiento (razonamiento inductivo) no nos contradecemos si aceptamos las premisas y negamos la conclusión. No contradecirnos no implica que tengamos razón. Un buen ejemplo de razonamiento inductivo puede ser a partir del último silogismo propuesto.

¿Es, entonces, la deducción un proceso eminentemente tautológico? La deducción descubre verdades particulares de gran valor. Si bien es cierto que “la suma de los ángulos internos de un triángulo suman 180°” es deducida de teoremas y axiomas que le anteceden, no menos cierto es que no se trata de una verdad evidente por sí misma. Debe ser descubierta, *y demostrada*.

En resumen. El razonamiento inductivo es de amplia utilización en la ciencia. El científico emplea métodos inductivos, corazonadas e intuiciones para investigar el mundo que lo rodea, y proponer afirmaciones de carácter general. Pero es la lógica deductiva la herramienta fundamental a la hora de proponer una teoría. Sin embargo, debe quedar claro que la generalidad y veracidad de las proposiciones que tienen la función de premisas están estrictamente ligadas al proceso inductivo que les dio origen. Como indica Braithwaite (1965, p. 286):

En la inferencia inductiva [...] no hay imposibilidad lógica de que las premisas sean verdaderas y la conclusión inductiva sea falsa: las circunstancias que hagan verdaderas a las premisas no están incluidas en las que hagan verdadera a la conclusión; y, en realidad, cuando la inducción es la inferencia de una generalización a partir de sus casos o ejemplos, o del conjunto de las hipótesis de nivel supremo de una teoría científica a partir de ejemplos o casos de las generalizaciones que constituyan las hipótesis de nivel ínfimo de la misma, lo que ocurre es lo contrario: las premisas de la inducción son las consecuencias lógicas de su conclusión [...].

Una de las formas de comprobar la validez de una premisa en el conocimiento científico, es el uso del experimento. Ello merece una consideración especial¹².

1.1.3.3 La experimentación

Con lo expresado hasta ahora, existen áreas del conocimiento o del pensamiento humano que podrían considerarse como científicas. La misma filosofía utiliza procesos de razonamiento rigurosos, establece hipótesis, y obtiene conclusiones

12. Existen otras formas de razonamiento. Véase APÉNDICE literal A.1.4.

basadas en dicho razonamiento. Sin ninguna duda se puede aseverar que la filosofía no pertenece a este tipo de conocimiento¹³.

Es importante aclarar la distinción que hacen algunos autores entre ciencias empíricas y ciencias formales. Las primeras se refieren a hechos que afirman o niegan algo acerca de lo que sucede en el mundo. Abarcan las ciencias naturales (física, química, biología...) y las ciencias humanas (psicología, sociología, antropología...). Las ciencias formales no se refieren a hechos sino a conceptos abstractos; serían la lógica y la matemática. En este texto consideraremos como ciencia, únicamente las ciencias empíricas, debido a la importancia que reviste la experimentación en el campo científico¹⁴.

Podemos centrar en Galileo el énfasis en la experimentación como una base fundamental del conocimiento científico. El experimento es la ruptura entre la ciencia antigua, Aristotélica, basada en aspectos cualitativos más que cuantitativos, apriorística (basada en el razonamiento puro y en principios preestablecidos e irrefutables) y la moderna, inductiva y experimental por la que se establece una teoría, basada en observaciones cotidianas. Posteriormente se diseña un experimento que, de forma contundente, compruebe las hipótesis propuestas. Una vez corroboradas éstas, la teoría toma más fuerza para establecer nuevas proposiciones que amplíen el campo de explicación. Podemos darnos cuenta de que Galileo centra sus estudios en las causas eficientes, dejando de lado las causas finales.

Por ejemplo, él experimentó con diferentes planos inclinados, todos de la misma altura, y con esferas de acero pulidas; al dejarlas rodar observó que en todos los casos las esferas llegaban con la misma velocidad final (más exactamente con igual rapidez), idéntica a la de la caída libre. Este experimento lo realizó para comprobar su definición de aceleración. La figura 1.3 ilustra el experimento.

Pero no todo experimento es de carácter físico. El experimento mental ha jugado a través de la historia de la ciencia un papel determinante. Un bello ejemplo de este tipo de experimento lo da el mismo Galileo cuando refuta la aseveración de Aristóteles respecto a que el tiempo que tarda un móvil más pesado que otro en llegar al suelo cuando ambos se dejan caer desde la misma altura, es menor en el más pesado que en el más liviano.

13. Esta aseveración es moderna. Hasta hace relativamente poco se discutía si la filosofía era una parte de la ciencia.

14. Consideramos La lógica y la matemática como herramientas fundamentales que permiten, en muchos casos, la expresión de teorías de forma concisa y precisa.

Experimento de Galileo de los planos inclinados

Fig. 1.3

Aristóteles explica (1922, Libro I, Cap. 6, p. 273b)

Un peso determinado recorre una determinada distancia en un tiempo dado; un peso más pesado se mueve la misma distancia en menos tiempo, siendo éste inversamente proporcional al peso. Por ejemplo, si un peso es doble, tardará la mitad de tiempo en recorrer la misma distancia.

Galileo indicó que si se tiene una piedra más pesada que otra, la primera, según Aristóteles, llegará primero al suelo que la segunda, si ambas se sueltan desde la misma altura. Ahora bien. Unamos ambas piedras mediante un pequeño hilo. Según Aristóteles, esta nueva piedra, más pesada, debe caer en un tiempo menor que cualquiera de las otras dos. Pero si lo pensamos bien, la piedra más pequeña, deberá frenar la caída de la más grande (ya que tarda más en caer); por otra parte la más grande forzará a la más pequeña a recorrer el espacio en menor tiempo. Esto implica que la “nueva piedra” deberá tener un tiempo de caída intermedio entre el tiempo más rápido de la más pesada y el más lento de la más pequeña. La única forma de resolver esta contradicción es aceptar que en todos los casos el tiempo de caída es el mismo¹⁵.

Realizar experimentos con el péndulo de Galileo nos parece fácil de imaginar: cambiar la longitud de la cuerda, usar pesos diferentes, variar el ángulo inicial... ¿Y qué podemos decir con respecto a un experimento con un grupo familiar? ¿Cómo se puede experimentar en las ciencias humanas?

15. El tema sobre experimentos mentales se amplía en el APÉNDICE, literal A.1.5.

A. Comte fue un investigador que creyó firmemente en los preceptos utilizados por la ciencia física. Estudió en detalle la manera cómo estos procedimientos podían llevarse a cabo en el campo de la sociología, su principal área de estudio. Para este filósofo de la Ciencia Social el procedimiento de investigación debía basarse en la observación, la experimentación y la comparación (Reale y Antiseri, 1999, Tomo 3, p. 274).

Según Comte, el método de las Ciencias Naturales (descubrimiento de leyes causales y el control que ellas ejercen sobre los hechos) se debe aplicar a la Ciencias Social. Él divide a la sociología en estática social y dinámica social. La estática social estudia las condiciones que se manifiestan en todas las sociedades de cualquier época: el hombre como ser social, la familia, la división del trabajo.

La dinámica social es el estudio de las leyes del desarrollo de la sociedad. Comte basa todo su desarrollo filosófico en la *ley de los tres estados*, como una ley necesaria en la evolución de la humanidad. El individuo, así como la especie humana, pasa sucesivamente por tres fases diferentes, tres maneras de pensar el mundo que se excluyen mutuamente: 1) *el estado teológico o ficticio*, donde toda la base del pensamiento es la imaginación y está supeditado a seres sobrenaturales; 2) *el estado metafísico o abstracto*, una modificación del primero, en donde los agentes sobrenaturales son reemplazados por fuerzas abstractas, “entidades” inherentes a los diversos seres del mundo cuya culminación es la *naturaleza*, la fuente única de todos los fenómenos; 3) *el estado positivo o científico*, “en donde renunciamos a conocer el absoluto, el origen y el destino del universo, y donde toda explicación se reduce a los hechos y a las relaciones necesarias entre ellos, a lo cual llamamos leyes” (Comte, 1980, p. 10).

En lo que respecta a las ciencias sociales, el trabajo científico comienza por la observación de hechos, la cual debe realizarse bajo hipótesis o supuestos con el fin de obtener leyes definitivas, tal como acontece en la física y la química.

En cuanto a la experimentación, hacía notar la gran diferencia entre experimentar en la física o la química, y en la fisiología y en la Ciencia Social. La experimentación sólo es posible cuando el fenómeno se puede alterar y controlar. Para el caso de la fisiología, indicaba que la experimentación debía basarse en el estudio de los casos patológicos que alteran la conexión normal de los acontecimientos. Para la sociología, la experimentación debía basarse en la comparación o analogía: este procedimiento permite obtener semejanzas y diferencias entre diversas sociedades en sus respectivas fases de desarrollo. También caben aquí los recuentos históricos. Desde otra perspectiva, hombres

de ciencia de diferentes áreas tienen opiniones similares. Según Claude Bernard, padre de la medicina experimental (Reale y Antiseri, *Op. Cit*, p.281-282):

No existe ninguna diferencia entre los métodos de investigación de la fisiología, la patología y la terapia. Siempre se trata del mismo método de observación y de experimento, que se basa, en todos los casos, en los mismos principios y que sólo varía en su aplicación, según la complejidad del fenómeno.

[...] El método experimental consiste en imponer una disciplina a la fantasía: elimina las hipótesis que sean incapaces de descubrir, explicar y prever un trozo o un aspecto del mundo real.

En el campo de la economía podemos citar con una posición similar a John Stuart Mill, Adam Smith, David Ricardo, Jeremiah Bentham.

Es importante destacar la observación que hace Jared Diamond a este respecto (2006, p.23):

¿Cómo estudiar científicamente la desaparición de las sociedades? Con frecuencia se clasifica erróneamente a la ciencia como “el cuerpo del conocimiento adquirido mediante la realización reiterada de experimentos controlados en un laboratorio”. En realidad, la ciencia es algo mucho más amplio: es la adquisición de conocimiento fiable sobre el mundo. En algunos campos, como el de la química y la biología molecular, los experimentos controlados reiterados en un laboratorio son factibles y ofrecen con diferencia los medios más fiables para adquirir conocimiento.

[...] Normalmente no es factible, legal, ni ético obtener conocimiento sobre aves exterminando o manipulando sus poblaciones de forma experimental en un lugar mientras se deja que las poblaciones intactas de otro lugar operen como grupos de control. Tuve que utilizar otros métodos. Problemas metodológicos similares afloran en muchas otras áreas de la biología de poblaciones, así como en la astronomía, la epidemiología, la geología, o la paleontología.

Una solución habitual consiste en aplicar lo que se denomina “método comparativo” o del “experimento natural”; es decir, comparar situaciones naturales que difieren en relación con la variable de interés.

El método comparativo consiste en estudiar un sistema considerando ciertas variables de entrada y ciertas variables de salida, buscando relaciones causales entre dichas variables mediante el uso de la estadística. Luego, cuando es posible, se escoge otro sistema que sea similar y se efectúa un análisis parecido,

para deducir de allí, conclusiones generales con respecto a las relaciones entre variables del fenómeno estudiado.

Jared va más allá (2011, p. 480-). ¿Cómo extraer principios generales del estudio de la historia? Sin duda obtener estos principios a partir de observaciones y experimentos en las ciencias físicas es mucho más sencillo. Pero no le va mejor a otras ciencias reconocidas como tales: la astronomía, la climatología, la ecología, la biología evolutiva, la geología y la paleontología. Nuestro autor denomina “ciencias históricas” a aquellos conocimientos en los cuales la metodología, la causación, la predicción y la complejidad tienen características comunes.

En cuanto a la metodología se ha destacado, en general, el experimento de laboratorio lo que permite aislar, preparar, manipular y controlar parámetros con el fin de comprobar resultados. Esto no opera así en la astronomía (por ejemplo interrumpir la formación de galaxias), ni en climatología (iniciar y poner fin a los huracanes y glaciaciones), ni en ecología evolutiva (exterminar una especie o repetir la evolución de otra). Aquí la observación, la comparación y los “experimentos naturales” –aquellos fenómenos que se dan en la naturaleza y permiten sacar conclusiones generales, como las explosiones de las supernovas, los accidentes que causan traumatismos en el cerebro, el comportamiento de comunidades aisladas por formaciones geográficas– son la sustancia misma de la experimentación de las “ciencias históricas”.

Respecto a la predicción el principio de causalidad es la base de la inferencia de leyes en la física y sus áreas afines. Este principio opera gracias a que en estas ciencias las causas últimas, los propósitos y las funciones carecen de significado. Pero estas características son fundamentales en las ciencias históricas. Así el físico no le atribuye una finalidad o una función al choque de dos esferas elásticas, ni le busca una causa final. Aunque puede ser importante conocer cómo una especie ha desarrollado una garra específica, es más importante conocer para qué ha servido este mecanismo, cuál es su función (¿mecanismo de defensa para los predadores más cercanos?), y su causa final (¿ha garantizado su supervivencia?). Recordemos a Aristóteles y sus cuatro causas. En el caso de las sociedades, como veremos posteriormente en este texto, el concepto de propósito es fundamental.

En las ciencias no históricas se puede predecir el comportamiento del sistema con bastante precisión. En este sentido, las ciencias históricas parecen no “pasar la prueba”: ellas aportan explicaciones *a posteriori* (crítica que Popper ha hecho

Cfr. numeral 1.4.1.4); las predicciones *a priori* son más difíciles. La razón es la complejidad de estos sistemas en comparación con los de las ciencias clásicas. Determinar *a priori* la forma en que una especie va a evolucionar, es imposible. Esto se debe a que un pequeño cambio en el proceso puede modificar sustancialmente la dirección del mismo. En este texto haremos referencia a esta importante observación cuando estudiemos la teoría del caos. Sin embargo es posible, bajo ciertas circunstancias, predecir algunos comportamientos sociales gracias al método comparativo. Evidentemente es un proceso inductivo.

En este contexto el uso del computador como herramienta para simular fenómenos complejos presta una valiosa ayuda, tanto para "experimentar" como para "predecir". Obviamente, tanto esta experimentación como esta predicción tienen características y exigencias diferentes a las tradicionales de estos dos conceptos. Incluso la experimentación como condición fundamental para el desarrollo de una ciencia ya no es exigible. Estos asuntos se retomarán a lo largo del texto.

1.2 Pensamiento lineal y sistémico

Como dijimos anteriormente, las relaciones lógicas entre los diferentes fenómenos se establecen al amparo del "principio de causalidad", principio que, según Kant, es un conocimiento *a priori*. La historia de este principio, como tantas otras nociones surgidas a lo largo del pensamiento filosófico, ha sido compleja. La causalidad implica, claro está, una relación de x a y permitiendo explicar el porqué un cierto fenómeno se ha producido (principio de causalidad, Cfr. numeral 1.1.3). Así, pues, podemos entender la relación causal como la ley o leyes que rigen acontecimientos de una misma especie (de ahí que existan distintas clases de leyes). Según el principio de causalidad que dominó el largo período de la ciencia clásica, todos los fenómenos se suceden bajo una relación estricta de causa-efecto. Y aunque hay varios tipos de nexo causal y varios tipos de causas, baste aquí con lo siguiente: la causalidad indica una relación secuencial (uno tras de otro) entre fenómenos que por su constancia nos permite explicar la ley que los rige; es decir, ella me permite expresar la regularidad de un conjunto de fenómenos o –como piensa Casirer– es "un punto de vista" que permite al hombre de ciencia hablar de leyes; esto implica una idea "determinista" o sea, el carácter inalterable de estas¹⁶.

16. Más detalle en el APÉNDICE literal A.1.6.

El principio de causalidad es entendido y aplicado tradicionalmente de manera “lineal”, es decir, que existe un principio y un fin en la cadena causal que explica o determina una ley. Decimos que la luz del sol es la causa que produce la fotosíntesis, el efecto; y la fotosíntesis es ahora la causa de que las plantas produzcan alimento. Esto es lo que se conoce como pensamiento lineal. Sin embargo, existe otra manera de entender y aplicar este mismo principio. Se trata aquí de lo que se conoce como pensamiento no lineal o pensamiento sistémico: una causa puede ser efecto de sí misma a través de una serie de relaciones de causa-efecto con otros elementos. El primer tipo de pensamiento es el que ha dominado la cultura occidental; es la herencia de la forma en que opera la ciencia tradicional o analítica. El sistémico comienza a perfilarse como una importante alternativa.

Como ejemplo de pensamiento lineal consideremos el caso de la fotosíntesis mencionada anteriormente. La figura 1.4 ilustra esta forma de pensar.

Luz del sol → Fotosíntesis → Alimento

Pensamiento lineal

Fig. 1.4

Sin embargo, esta misma situación puede enfocarse de una manera diferente (ver figura 1.5).

Pensamiento sistémico

Fig 1.5

La energía solar produce la fotosíntesis, la cual a su vez produce glucosa y oxígeno; estos dos elementos ocasionan, al mismo tiempo, respiración aeróbica y degradación. El proceso genera calor, que se disipa en el ambiente que por su parte origina dióxido de carbono y agua, el cual es incrementado por los combustibles fósiles. Dióxido de carbono, agua y energía solar reinician la fotosíntesis. Nótese cómo el dióxido de carbono es, pues, causa y efecto debido al camino circular que forma con la fotosíntesis, la producción de glucosa y oxígeno y la respiración aeróbica. Esta formación de bucles o ciclos se conoce como “retroalimentación” y es la característica básica de este tipo de relaciones.

Sin embargo, es necesario incluir otro concepto para poder estudiar la complejidad con herramientas más poderosas: es el de relación (dependencia) lineal y relación no lineal.

Matemáticamente, la linealidad implica la posibilidad de obtener una línea recta cuando las causas y los efectos se relacionan. Supongamos que un objeto cuesta \$2.000. Si queremos comprar 3 de ellos entonces deberemos pagar \$6.000, y 10 costarían \$20.000. Eventualmente, 100 costarían \$200.000. La gráfica correspondiente se indica en la figura 1.6 con la línea continua.

Relaciones lineales y no lineales

Fig. 1.6

Pero es lógico pensar que si deseamos comprar más de 50 entonces se nos ofrezca una rebaja. En concreto, nuestro vendedor estaría dispuesto a vendernos la unidad a \$1800 en caso tal. ¿Pero y si deseamos comprar más de 100? El precio unitario propuesto por el vendedor sería entonces de \$1.600. Es la curva indicada como no lineal.

Es posible tener pensamiento lineal con relaciones no lineales. Un ejemplo sencillo es el anterior.

La estructura lineal la destaca la relación:

Cantidad comprada $\rightarrow$ Precio unitario de venta.

Los fenómenos complejos, en general, muestran estructuras retroalimentadas con relaciones no lineales. El pensamiento o el enfoque sistémico mira más hacia la estructura del sistema –a las interrelaciones entre las partes– que a los simples hechos o al análisis de las implicaciones futuras de tales hechos. La no linealidad será un tema recurrente a lo largo de este texto.

1.3 Ciencia privada. Ciencia pública

A la altura de esta reflexión el estudiante podrá preguntarse: entonces ¿qué es la ciencia? Hasta aquí sólo nos hemos referido a algunos criterios que pueden acercarnos a dicho concepto, criterios que, como bien puede verse, han cambiado en el transcurso del siglo XX.

Si no existe un método como tal, si no existen recetas seguras a seguir en una investigación, ¿cómo determinar cuándo un conocimiento es científico y cuándo no? Aquí señalaremos un criterio fundamental para responder a esta pregunta. Se trata de la diferencia que hay entre *ciencia privada* y *ciencia pública* (Holton, 1975, p. 279).

Podemos intentar ahora un resumen preliminar de los puntos principales que hemos considerado hasta ahora. Podemos también considerar al científico físico como un buscador de armonías y constancias en la jungla de la experiencia. Tiende al conocimiento y predicción, principalmente por el descubrimiento de leyes matemáticas. Sin embargo, estas contribuciones individuales constituyen solamente una parte de la cuestión, pues el avance de la ciencia se realiza de dos modos: Uno de ellos, al que llamaremos ciencia privada o ciencia-en-formación S_1 comprende los elementos especulativos y creativos, el continuo aflujo de las contribuciones individuales, realizadas de un modo peculiar propio, sin un examen consciente de sus métodos, con sus propias motivaciones, y desinteresadas quizá, a su vez,

de los grandes problemas filosóficos de la ciencia. Por el contrario, la ciencia pública ciencia-como-institución S_2 es una síntesis en continuo crecimiento de las contribuciones individuales que han demostrado su utilidad y significado de generación en generación de científicos. Las tablas de constantes físicas y químicas, las ecuaciones fundamentales de los tratados y libros de texto, forman el núcleo del residuo S_2 , destilado de las conquistas triunfales individuales S_1 , comprobadas una y otra vez por el múltiple testimonio de la experiencia general.

El proceso del conocimiento científico no es un proceso con fases o pasos que deban seguirse rigidamente. Tal idea es, tal vez, el más grave error que sobre este tema se tiene. Se dice que existe un “método científico”, un método exclusivo de la ciencia y que tradicionalmente se presenta en varias fases, la primera de las cuales es la proposición de una (o varias) hipótesis; enseguida, el desarrollo de una tesis, la comprobación y experimentación y, finalmente, la explicación o predicción de nuevos sucesos no explicados o conocidos previamente.

El investigador no sólo lleva procesos que son analíticos y sintéticos, utilizando la inducción o la deducción, sino que también puede mezclar los métodos de acuerdo con las necesidades y exigencias que se vayan dando en el transcurso de la investigación. Pero si bien la investigación debe ser planeada metodológicamente, en ella juegan un papel fundamental aspectos como la fantasía, la creación, la intuición, el azar. El investigador debe ser altamente creativo para formular hipótesis y teorías y abrir caminos que lo puedan conducir a su verificación y que le permitan ir más allá de las apariencias; debe ser intuitivo para considerar en sus observaciones variables que parecerían sin importancia, porque aunque la investigación implica reglas de control de las distintas situaciones que concurren en un fenómeno, este control no puede ser absoluto; pueden darse situaciones inesperadas en las que el investigador puede cometer errores en el proceso que podrían conducirlo felizmente a descubrimientos que no eran predecibles o a otros errores y descubrimientos que cambiarían el rumbo de su investigación.

También es importante no olvidar que los descubrimientos científicos van directamente relacionados con los pensamientos religiosos y filosóficos de la época. Como dice Koyré (1988, p. 4):

La influencia del pensamiento científico y de la visión del mundo que él determina no está sólo presente en sistemas –tales como los de Descartes o Leibniz– que abiertamente se apoyan en la ciencia, sino también en doc-

trinas –tales como las doctrinas místicas– aparentemente ajenas a toda preocupación de este género. El pensamiento, cuando se formula como sistema, implica una imagen, o mejor dicho, una concepción del mundo, y se sitúa con relación a ella: la mística de Boehme es rigurosamente incomprensible sin la referencia a la nueva cosmología creada por Copérnico.

En la historia de la ciencia existen numerosos ejemplos de hombres de gran creatividad que han manifestado cómo durante las primeras fases de su trabajo, no existía una forma clara de poder expresar o proponer la investigación a desarrollar. Era casi una intuición. Galileo intuyó que la aceleración uniforme podía (y luego demostró que debía) definirse con base en incrementos iguales de velocidad medidos en incrementos iguales de tiempo. Torricelli supuso que el aire ejercía una presión sobre los cuerpos. Newton creyó que los cuerpos caían debido a que las masas ejercen fuerzas de atracción entre sí. Einstein se imaginó que la perspectiva del mundo observado desde un haz de luz debía ser diferente a la perspectiva cotidiana. La propuesta de la doble hélice del ADN por Watson y Crick surgió de una toma con rayos X de ADN cristalizado realizada por Rosalind Franklin. En Gratzner (2002) hay una gran cantidad de anécdotas relacionadas con este tema.

Lo anterior no debe conducirnos a pensar que estas primeras fases surgen de una imaginación sin límites, sin ninguna base previa, teórica o experimental. Todo lo contrario. Ellas ocurrieron en estas mentes privilegiadas porque, aparte del don natural de su inteligencia, tenían profundos conocimientos de desarrollos anteriores sobre los temas que estaban estudiando; conocían las dificultades que estas teorías predecesoras habían encontrado para explicar ciertos fenómenos (lo que se conoce con el nombre de “anomalías”). Una poderosa combinación de inteligencia, perseverancia, suerte, intuición y conocimiento son las que permiten que una teoría científica llegue a feliz término. Por otra parte, la palabra suerte –o azar– quizás genere alguna inquietud. Cierta o no, la caída de la manzana a partir de la cual atribuyen algunos historiadores de la ciencia el inicio de la teoría de gravitación universal de Newton, es un buen ejemplo de cómo sucesos fortuitos pueden desencadenar procesos intelectuales de gran envergadura. Todos hemos visto caer objetos. Pero fue a Newton a quien este hecho llamó la atención y meditó sobre él. Arquímedes, con su famoso “Eureka”, desencadenó todo un proceso que permitió explicar científicamente que la corona del rey Hierón de Siracusa, no tenía el oro que había sido entregado al orfebre y, además, el porqué y con qué fuerza, los

barcos flotan. Un accidente durante los experimentos de Röntgen permitió el descubrimiento de los rayos X.

En los estudios actuales en neurociencia, se ha encontrado que una vez que el cerebro ha sido utilizado concentradamente en una situación específica, el dejar de pensar en ella permite que la llamada *red neuronal por defecto* que está conformada por cerca del 90% de nuestro cerebro, opere en forma libre, estableciendo conexiones que de otra manera no serían posibles, lográndose así el "milagro" de las soluciones novedosas (Brafman & Pollack, 2014).

Pero esto no es suficiente para aceptar una teoría como científica. Podríamos pensar que cosas similares ocurren en la quiromancia, la astrología y en otros conocimientos que no son considerados como parte del ámbito científico. Estamos hablando de la ciencia privada o ciencia en formación. Es el momento del desarrollo y crecimiento; es el inicio de un embrión, vulnerable en su forma pero potencialmente fuerte en sus posibilidades. Un roble, en su fase inicial de crecimiento es débil; fácilmente podemos destruirlo. Pero si dejamos pasar el tiempo y permitir que madure y se forme, entonces obtendremos un árbol robusto, lleno de vigor. Igual el conocimiento científico. Por esta razón, durante esta parte del proceso los científicos son muy cautelosos en dar a conocer sus descubrimientos. Sólo aquellos que están íntimamente ligados a la investigación en ciernes están al tanto de lo que ocurre. Pero es necesario llegar a un estado en el cual el conocimiento pueda ser estructurado, un estado en el cual una teoría permita englobar los hechos observados y los experimentos realizados; es necesario pasar de la idea de que el aire ejerce presión sobre los objetos en la tierra, a medir dicha presión, a predecir lo que pueda ocurrir, a explicar el porqué la altura de la columna de mercurio no depende del área del tubo, tal como lo hizo Torricelli¹⁷. Este aspecto es lo que se denomina "ciencia como institución" o "ciencia pública". Es la que se da a conocer a la comunidad científica y a la humanidad en general.

¿Qué caracteriza a la ciencia como institución? ¿Cuáles son las exigencias que se le hacen a una teoría para hacerla pública? Esto corresponde al tema sobre la formalización de la ciencia, lo cual requiere algunos conceptos previos.

17. Recordamos de nuevo que en el APÉNDICE, numeral A.1.3 se analizó este experimento.

1.4. Resumen

En este capítulo hemos hecho una introducción intuitiva al concepto de sistema, dejando para posteriores capítulos una definición mas exacta. Respecto al concepto de ciencia, se ha enfatizado en la dificultad que implica ofrecer una definición que satisfaga las condiciones que esta debe tener, a saber, identificar aquello que está incluido por ella y aquello que no. Sin embargo, hemos adelantado criterios que sirven para estimar si un conocimiento puede ser considerado científico, tales como qué es conocer, que tipos de conocimiento existen, que se entiende por objeto, en que consiste la objetividad, que entendemos por método, por inducción y deducción, por experimento. Todavía quedan algunos temas por tratar.

Se hizo referencia a la forma como, según E. Kant, nuestro cerebro logra interpretar el mundo. Tres principios básicos rigen este proceso: causalidad, espacialidad y temporalidad, principios que condicionan nuestra manera de comprender los fenómenos que experimentamos.

Se precisan dos términos muy utilizados en la ciencia: objeto y objetividad. Aquello que es susceptible de conocerse y lo que es observado sin injerencia del observador.

Con respecto al método de investigación se aclaró que no existe un “método de la ciencia” sino métodos o procedimientos que dependen del área que se esté investigando destacándose el principio de causalidad como base fundamental de nuestra comprensión del mundo.

Se analizó con cierta extensión la inducción, la deducción y el silogismo, herramientas claves para un buen proceso investigativo.

Aunque más adelante se tratará de nuevo el tema bajo una perspectiva diferente, se indicó que la experimentación es una de las características sin las cuales un conocimiento difícilmente puede llamarse científico.

También hemos planteado una diferencia entre pensamiento lineal –el utilizado en la ciencia tradicional–, y el pensamiento no lineal o sistémico, mas adecuado para comprender los fenómenos complejos de los cuales se ocupa la Teoría General de Sistemas.

Finalmente, la distinción entre ciencia privada y ciencia publica permite comprender la forma como la investigación científica se lleva a cabo, separando el

proceso de desarrollo de la misma con la forma como estos deben ser publicados ante la comunidad científica. En el siguiente capítulo complementaremos este tema.

CAPÍTULO 2

LA CIENCIA COMO SISTEMA FORMAL

2.0 El concepto de formalización

Para que un conocimiento pueda considerarse como científico, es necesario que sea sometido a reglas muy rigurosas. A esto se le conoce como *formalización del conocimiento científico*. Para ello debemos primero conocer la manera como la matemática ha formalizado (estructurado) sus teorías y luego cómo estas han sido adaptadas a las ciencias naturales.

Dedicaremos este capítulo a la discusión de este importante tema y cómo varios filósofos lo han analizado.

2.1 La formalización de la matemática

Las consideraciones que siguen son tomadas de la forma como el pensamiento matemático ha ido estructurando su saber. Se ha escogido este tipo de pensamiento porque, sin duda, es el procedimiento más elaborado que ha desarrollado el ser humano. Casi estaríamos tentados a hablar de “perfección” si no fuera por la conclusión de Gödel cuando demostró, mediante el famoso teorema que lleva su nombre, que la matemática no es coherente¹⁸.

Uno de los aspectos que distingue a las matemáticas es su carácter deductivo. Es fácil recordar cómo en geometría se descubren nuevos teoremas (es decir, nuevas propiedades) a partir de otros ya conocidos. Sin embargo, no es posible que este procedimiento deductivo sea *ad infinitum*; en alguna parte debemos iniciar el proceso sin exigirle a este comienzo ninguna deducción de premisas o verdades anteriores. A estas proposiciones iniciales se las denomina *axiomas* o *postulados*¹⁹. Como lo explicó Aristóteles las ciencias demostrativas deben

18. El teorema de Gödel establece que en un sistema deductivo es posible que existan conclusiones (teoremas) pertenecientes al sistema y que no sean deducibles de los principios (axiomas) de base.

19. Los axiomas son proposiciones que se consideran verdades generales que no

partir de principios indemostrables; de lo contrario, los pasos de la demostración serían infinitos.

Ejemplos de axiomas son los siguientes:

- Si a cantidades iguales se agregan o quitan cantidades iguales, los resultados son iguales.
- Dos cantidades iguales a una tercera son iguales entre sí.
- Toda cantidad puede reemplazarse con su igual.

Ejemplos de postulados, en la geometría euclidiana, son los siguientes:

- Por dos puntos dados cualesquiera puede hacerse pasar una recta, y sólo una.
- Toda recta puede prolongarse en ambos sentidos. El camino más corto entre dos puntos es la recta que los une.

Los axiomas y postulados son el soporte de toda teoría matemática. A partir de ellos, y utilizando un proceso lógico-deductivo, se obtienen afirmaciones o proposiciones cuya verdad o falsedad dependen únicamente de este proceso. Son los corolarios y teoremas.

Para que una teoría matemática sea una *teoría formal* es necesario, aparte de disponer de un cuerpo axiomático, que posea un grupo de definiciones, de proposiciones y de operaciones así como un proceso de razonamiento deductivo.

Consideremos el caso de las *definiciones*. Cualquier intento de definir una palabra en el idioma español, utilizando sólo palabras de este idioma, termina en un círculo vicioso. Si queremos definir la palabra “tierra” encontraríamos una definición como: “planeta en el cual habitamos”. Al buscar “planeta” hallamos: “uno de los nueve cuerpos que forman nuestro sistema solar”. Por su parte, el “sistema solar” se define como “conjunto de planetas compuesto por el Sol, Mercurio, Venus, la *tierra*, Marte, Júpiter, Urano, Neptuno y Plutón”. Volvemos a la palabra “tierra” y dos veces encontramos la palabra “planeta”.

Las definiciones en matemáticas deben tener sentido y ser consistentes. Para ello es necesario recurrir a una propuesta similar a la de los axiomas: una teoría matemática debe disponer de un grupo pequeño de términos o conceptos indefinibles, a partir de los cuales se pueden establecer definiciones. Así, en

necesitan demostración y que pueden utilizarse en cualquier campo del conocimiento. Los postulados son verdades relativas a un área específica del conocimiento.

geometría se toman como palabras indefinidas al *punto* y la *línea*. Con ellas podemos definir “segmento de línea”: “porción de una línea contenida entre dos puntos dados sobre ésta”. Ejemplos de definiciones son:

- Un conjunto A es un subconjunto de un conjunto B si y sólo si cualquier elemento de A es un elemento de B .
- Se dice que dos ángulos son adyacentes cuando tienen un mismo vértice y un lado común, y son exteriores el uno al otro. (Esta definición supone que “vértice” ha sido definido previamente).
- Un conjunto de números reales se dice que es un conjunto inductivo si tiene las siguientes propiedades:
 - a) El número 1 es un conjunto.
 - b) Para todo x en el conjunto, $x + 1$ está también en el conjunto.

Además de los axiomas y de las definiciones, en matemáticas es necesario establecer proposiciones. Éstas son frases a las cuales se les puede aplicar uno y sólo uno de los términos verdadero o falso. Los términos *proposición*, *verdadero* y *falso* son palabras indefinidas. Podemos decir que los axiomas y los postulados son proposiciones. Ejemplos de ellas son:

- $7+5=12$, (verdadera).
- Dos ángulos opuestos por el vértice son iguales (verdadera).
- El cuadrado de cualquier número entero es par (falsa).

Finalmente, es necesario establecer un conjunto de *operaciones*. En geometría, por ejemplo, el desplazamiento y la superposición de figuras son dos operaciones permitidas que no alteran las propiedades de las mismas. En la aritmética la suma y el producto. En el cálculo diferencial, la derivada y la integral de funciones.

Una vez establecida una teoría matemática, la solidez de su construcción puede ser desmoronada por un único contraejemplo. Dijimos anteriormente que el cuadrado de todo número entero es par. Aunque esto es cierto para $2^2 = 4$ y $6^2 = 36$, no lo es para $3^2 = 9$. Esta proposición es por lo tanto, falsa. Más sutil es la afirmación: *el cuadrado de todo número entero par, es par*. Podemos observar que no importa el número par que propongamos, su cuadrado siempre será par. Pero ésta no es una demostración aceptable en matemáticas. Para ello debemos seguir un proceso lógico deductivo.

Demostración:

Un número par se puede representar (es decir, definirse) de la siguiente manera: $p = 2n$ siendo n cualquier número entero. El cuadrado de este número es $p^2 = 4n^2 = 2(2n^2)$ que, por definición, es par, lo cual demuestra el teorema.

La formalización se refiere fundamentalmente al lenguaje utilizado. Un lenguaje que debe estar sometido a unas "reglas fijas de formación de expresiones y significados". Es la estructura axiomática regida por un sistema lógico-deductivo que, en principio, debe ser matemático.

Podríamos representar esquemáticamente el proceso de formalización de una teoría matemática mediante el diagrama de la figura 2.1²⁰.

Formalización de la matemática
Sistema lógico deductivo

Fig. 2.1

Es importante aclarar que para aumentar el rigor y la precisión fue necesaria una depuración del lenguaje de la matemática.

20. Este tema se ilustra con un ejemplo concreto en el APÉNDICE literal A.2.1.

2.1.1 Depuración del lenguaje matemático

A principios del siglo XIX grandes matemáticos intentaron sistematizar los conceptos de función, límite, continuidad. También conceptos tales como número natural, infinito, número real fueron analizados cuidadosamente, pues se descubrieron algunas contradicciones o anomalías que intentaban minar las bases mismas de la matemática. El edificio de la matemática se fue construyendo espontáneamente pese a su aparente rigor.

Muchos de sus fundamentos descansaban en el lenguaje común, que, en ocasiones, era riguroso y preciso, pero en otras era muy vago y confuso. La tarea de subsanar esta falla fue enorme y estuvo en manos de los grandes matemáticos del siglo XIX y del siglo XX.

Se hizo una importante distinción entre lenguaje objeto y metalenguaje. D. Hilbert, uno de los pioneros en esta distinción, sostenía que la afirmación “la aritmética no es contradictoria” era una afirmación no matemática; las discusiones sobre esta no-contradicción se desarrollan no en un plano matemático, sino meta-matemático. Le correspondió a Carnap aclarar que la lengua-objeto es la lengua que constituye el objeto de la investigación, mientras que el lenguaje que utilizamos para hablar acerca de la lengua-objeto es el metalenguaje. Así, la aseveración “para todo número real x , el cuadrado de $x-3$ es igual al cuadrado de x , menos seis veces el valor de x , mas nueve”, tiene una expresión en la lengua-objeto de la matemática como sigue: $\{\forall x, x \in \mathbb{R}, (x-3)^2 = x^2 - 6x + 9\}$. Sin embargo, la afirmación: “la expresión anterior sirve para calcular fácilmente el cuadrado de ciertos números, por ejemplo $97 = 100 - 3$ ”, es una declaración que no pertenece a la matemática; es un meta-lenguaje.

Se podría decir que la formalización de un lenguaje L (o de una teoría) equivale a especificar mediante un metalenguaje L_1 la estructura de L . Se especifica mediante L_1 la forma de las expresiones de L (Ferrater Mora, 1994, p. 1815).

2.2 La formalización en la ciencia

El gran desarrollo y rigurosidad alcanzados por la matemática, indujo a los hombres de ciencia a intentar un procedimiento similar para la presentación de las teorías científicas. Esta es la ciencia como institución o ciencia pública a la que hemos hecho referencia. Es la exigencia que se le hace a toda teoría

que pretenda ser científica para tener carta de reconocimiento. Debe ser presentada mediante un proceso lógico-deductivo, con capacidad de predicción. Mirado en detalle, parece una descripción de lo que algunos autores llaman el *método científico*: hipótesis, conclusiones, predicciones. Pero no podemos confundir el proceso de adquisición del conocimiento, que es lo que realmente se hace en la ciencia, con la forma en que la comunidad científica exige que deba presentarse.

Fue la física la que, desde sus comienzos y gracias al uso de la matemática como su lenguaje, inició un proceso de formalización a la manera que hemos descrito en este texto. Pero las dificultades encontradas en este proceso fueron muy superiores a las halladas para el caso de la matemática. Por ejemplo, ¿qué es un axioma en el caso de la física? No podemos afirmar aquí que el axioma es una verdad indemostrable; no podemos proponer un axioma desligado de la realidad (recordemos a Feynman numeral 1.1.3.1). En este aspecto los hombres de ciencia han recurrido, en ocasiones, a *hipótesis* que no son posibles de negar a la luz de la teoría expuesta. Un buen ejemplo es recordar cómo, a principios del siglo XX, se postuló que la naturaleza estaba compuesta de átomos; sin embargo estos jamás habían sido vistos. Actualmente ya el átomo no es una mera hipótesis. La ciencia física se centra ahora en una nueva propuesta: el universo está compuesto por *cuerdas o por branas* (espacios vibracionales) que se encuentran en un espacio de dimensión diez u once, abandonándose así el concepto de partícula. Otro ejemplo es la postulación del “gen” como elemento transmisor de la herencia.

Podemos decir que existen dos tipos de hipótesis. Aquellas que son verificables o refutables por la experiencia y otras que, sugeridas por la experiencia, son valiosas a pesar de no poder ser verificadas o refutadas por ella. A estas últimas Poincaré las denomina “principios”. Desde esta perspectiva lo teorizado es un *como si*: la naturaleza es “como si” estuviera compuesta por cuerdas; la herencia se trasmite “como si” existieran los genes. Se confía en estas hipótesis en la medida en que las conclusiones que se obtienen de ellas, mediante un sistema deductivo, explican la realidad observada (o al menos parte de ella). Galison (2005, p. 298) hace la siguiente acotación frente a las discusiones entre Poincaré y Einstein sobre el principio de relatividad, ante la pregunta de si los principios son inevitables y necesarios o una mera conveniencia:

Para Poincaré, también, los principios se hacían probables por la experiencia, pero los principios eran precisamente lo que era conveniente; podían

mantenerse frente a la experiencia sólo a costa de inmensos inconvenientes. “Los principios – había escrito Poincaré en *La ciencia y la hipótesis*– son convenciones y definiciones disfrazadas”. Para Einstein, los principios eran más que definiciones, eran pilares, soportes de la estructura del conocimiento. Y ello a pesar de la circunstancia de que nuestro conocimiento de los principios nunca podía ser seguro; nuestro mantenimiento de ellos era necesariamente provisional, solamente probable, nunca obligado por la lógica o la experiencia.

Adicionalmente, la veracidad de una hipótesis escapa al hecho simple de la aplicación de una tabla de verdad. Carnap identificó diferentes tipos de proposiciones que dieron luz a esta dificultad: las tipo *C*, pertenecientes a la *axiomática* y a las reglas de inferencia, las tipo *L*, pertenecientes al significado (*semántica*) y las tipo *F*, pertenecientes a la verificación del hecho. De esta manera, las proposiciones en matemática son del tipo *C*-verdaderas o *C*-falsas. En cambio en las ciencias físicas no sólo la veracidad o falsedad son de tipo *C*, sino que dependen también del significado y de la confirmación del hecho. La proposición “los cuerpos en caída libre partiendo del reposo recorren un espacio igual al cuadrado del tiempo transcurrido multiplicado por la constante de gravedad ($h=1/2gt^2$)”, debe ser demostrada según reglas de inferencia, estar acorde con una realidad –es decir, los símbolos deben tener un significado real– y debe, además, ser comprobada.

Con respecto a las definiciones la situación no es menos complicada. ¿Cómo definir “puramente” masa, espacio, tiempo? En principio es posible considerarlos como elementos no definibles. Pero a medida que la teoría se va desarrollando no siempre es posible recurrir a este artificio.

En un intento de precisar el lenguaje se ha desarrollado la semiótica que es el estudio de los signos (diagramas, palabras, ideogramas...) ²¹. La semiótica considera tres elementos básicos: el signo (*S*) como tal (vehículo signico), lo designado (*D*: designatum) y la interpretación del signo (*I*). El signo @ por ejemplo es interpretado por algunos como “arroba”; para otros es parte de una dirección electrónica. En este caso $S = @$, $D = \text{“arroba”}$ (25 libras) o “forma de comunicarme con alguien”, $I =$ las interpretaciones que sugieren los signos: medida de peso, sitio web.

Estos elementos pueden combinarse de diversa manera. Para los semiotistas hay tres combinaciones que son de importancia para su estudio: la relación signo-

21. No existe una teoría unificada al respecto. Esta es una de las propuestas.

designatum que da origen a la semántica (ciencia del estudio del lenguaje que se refiere a las relaciones de los signos con los objetos a los que son aplicables); la relación signo-signo que da origen a la sintaxis (ciencia del lenguaje que se refiere a las relaciones entre palabras, a la estructura gramatical de los arreglos de los elementos del lenguaje); y, finalmente, la relación signo-intérprete que da origen a la pragmática.

Para el estudio del lenguaje matemático son necesarias y suficientes consideraciones de tipo sintáctico (que son fundamentales en la lógica); para el lenguaje de la física son necesarias, además, consideraciones semánticas. Las proposiciones tienen relación con la experiencia.

En su intento de seguir el camino de la formalización matemática, la física encontró otro gran escollo. Si bien es cierto que en matemáticas un sólo contraejemplo es suficiente para invalidar toda una teoría, esto no es cierto en las ciencias físicas. Si esto fuera así, no existiría ninguna teoría científica válida en la actualidad. La teoría geocéntrica del universo, defendida por los griegos y que fue válida hasta el siglo XVI, presentó contraejemplos (anomalías) que fueron modificando el modelo propuesto hasta que finalmente cedió el paso a la teoría heliocéntrica. Un caso interesante de este proceso es el retroceso en la trayectoria de mercurio²². Durante su movimiento en el firmamento, este planeta presenta una “irregularidad” debido a que, en ciertos períodos del año, “se devuelve” en lugar de continuar su “trayectoria regular”. La figura 2.2 trata de ilustrar esta situación.

Retroceso en el movimiento del planeta mercurio

Fig. 2.2

Este movimiento es inexplicable cuando las órbitas de los planetas son circulares. Como el sistema geocéntrico proponía a la tierra como centro del universo y los demás planetas, incluyendo el sol, giraban alrededor de ella, Apolonio propuso lo que llamó los “epiciclos”.

²². Sucede cada 116 días y dura alrededor de 23 días en cada caso. De hecho este fenómeno de retroceso es observable en casi todos los planetas del sistema solar.

Esta teoría indicaba que Mercurio realmente no seguía un movimiento circular alrededor de la tierra; giraba alrededor de un centro, el cual giraba alrededor de la tierra. De esta manera surgía el movimiento observado. La figura 2.3 muestra la propuesta de Hiparco para los planetas que mostraban este comportamiento²³.

Modelo geocéntrico de Hiparco

Fig. 2.3

De hecho, la refutación completa así como la prueba completa de la totalidad de las hipótesis de una teoría científica no es posible. Lo que ocurre es que ante la indiscutible evidencia de un gran número de contraejemplos, la teoría es desechada, y esto sólo sucede si se tiene a mano otra teoría que pueda reemplazar convenientemente a la anterior.

Como lo dice Braithwaite (1965, p. 36):

23. Adaptado de J. Aguirre, A. Serrano, M.M. Hernán: *Historia de la Astronomía*. <http://www.tallerdeastronomia.es/>

En casi todos los sistemas es posible mantener cualquier hipótesis frente a datos o testimonios aparentemente contradictorios a costa de modificar a los demás.

El uso en la ciencia de la matemática como lenguaje y como herramienta lógico-deductiva sin duda tenía grandes ventajas. Garantizaba que el proceso de formalización de la ciencia pudiera acercarse al proceso de formalización de la matemática. Pero, ¿por qué esta relación estrecha entre matemática y ciencia?

Hay una amplia discusión sobre la forma como la matemática ha desarrollado sus teorías. Una escuela, de fuerte influencia, sostiene que, en general, la matemática está ligada a la experiencia. Así, la operación de contar y calcular dio origen a la aritmética; la medición de las parcelas y la observación de los astros dieron origen a la geometría; los problemas de la física y en particular el movimiento de la luna alrededor de la tierra originó el cálculo infinitesimal; el estudio de las formas de la naturaleza dio origen a la teoría de fractales. Otra escuela aboga por un conocimiento matemático que pueda en principio desligarse de este vínculo con la naturaleza; de otra manera no se hubiera desarrollado la teoría de conjuntos, la teoría de matrices, el análisis funcional. En estos casos es sabio tomar una posición intermedia aceptando que, en ocasiones, hay una relación naturaleza-matemática y en otras no. Pero cualquiera que sea la posición adoptada, sí es claro que en su formalización, la matemática es abstracta. Nagel y Newman dicen al respecto (1970, p. 26):

La concepción de la matemática como “ciencia de la cantidad” es inadecuada e induce a confusión. La matemática es la disciplina por excelencia que obtiene conclusiones necesarias a partir de cualquier conjunto de axiomas (o postulados) y la validez de las inferencias obtenidas no depende de ninguna interpretación particular que pueda atribuirse a los postulados.

De esta forma, la matemática está siempre adelante. Se desarrollan teorías que no necesariamente tienen una aplicación inmediata. Es en el futuro donde tal aplicación se podría encontrar. La teoría de matrices por ejemplo, fue desarrollada para estudiar los sistemas de ecuaciones. Sin embargo, en la actualidad su aplicación práctica es invaluable. Esta relación, matemática-realidad se retomará más adelante.

Para el caso de las ciencias empíricas diremos que los axiomas se convierten en *hipótesis* (propuestas) cuya validez es necesario demostrar. Estas hipótesis

científicas son proposiciones o leyes que deben ser sometidas a contrastación mediante la experiencia, es decir, se debe corroborar si se trata o no de una ley científica. Aquí, lo que constituye la experiencia son hechos que pueden observarse bien sea en forma directa o por medio de aparatos, o mediante un experimento mental. Estas realidades son relativas a los objetos materiales, acontecimientos físicos, sensaciones y otras experiencias.

Incluso en la matemática, la posición moderna llama la atención sobre el carácter de verdad evidente o autoevidente fuera de toda discusión de los axiomas o postulados. El desarrollo de las geometrías no Euclidianas surgió de la puesta en duda del quinto postulado de Euclides: “Por un punto exterior a una recta, sólo es posible trazar una recta que no corte a la primera”. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, podemos asegurar que el postulado es válido dentro de la geometría plana, aunque no lo sea para las geometrías de Riemann y Lobachevsky²⁴. Este tipo de posición no es aceptable en una teoría científica. Las hipótesis, en fin de cuentas, no son otra cosa que puntos de partida, comienzos de un proceso de razonamiento. William Whewell lo dice así:

Las leyes y teorías científicas no son más que hipótesis inventadas por mentes humanas creativas, hipótesis que había que someter después a la prueba de los hechos.

R. Feynman (2010, *Op. Cit.* p.54) lo expresa de esta manera:

En física poseemos [estos] vastos principios que abarcan diferentes leyes y cuya derivación no conviene tomar demasiado al pie de la letra, porque si creemos que un principio es válido solamente si lo es el precedente no seremos capaces de entender las interconexiones entre las diferentes ramas de la física. Algún día, cuando la física esté completa y conozcamos todas sus leyes, quizá podamos partir de ciertos axiomas y de ahí deducir todo el resto. Pero mientras no conozcamos todas las leyes, podemos valernos de algunas de ellas para especular sobre teoremas que no podemos demostrar. Para comprender la física hay que mantener un adecuado equilibrio y tener en la cabeza las distintas proposiciones y sus interrelaciones, porque las leyes a menudo tienen implicaciones que van más allá de lo deducible. Esto sólo dejará de tener importancia cuando se conozcan todas las leyes.

Finalmente, sobre el uso de la matemática como el lenguaje de la ciencia, hagamos la siguiente acotación. Tal y como lo anotamos anteriormente, Ca-

24. Véase una ampliación del tema en el APÉNDICE, literal A.2.2.

pra & Luisi (2014, p. 2) con respecto al concepto de ciencia comentan que si bien la observación requiere de comprobación empírica, lo que implica el experimento, esto no siempre es cierto, como en el caso de la astronomía o la paleontología; que aunque el lenguaje matemático donde sea posible debe ser usado para interconectar los datos de manera coherente, sin contradicciones internas, esto no es siempre posible, especialmente en las ciencias sociales, en donde este intento es problemático debido a lo restrictivo que es dicho lenguaje, perdiendo así su utilidad. Por estas razones, en las últimas décadas ni la formulación matemática ni los resultados cuantitativos son componentes esenciales del llamado "método científico".

Antes de continuar con nuestra discusión, ilustraremos lo aquí expresado con un ejemplo de la biología.

2.2.1 Ejemplo en biología: leyes de la herencia

El siguiente ejemplo no obedece estrictamente a la manera como Mendel dio a conocer la teoría sobre las leyes de la herencia. Sin embargo, sirve para mostrar cómo, implícitamente, existe un procedimiento científico alrededor de dicho tema.

La *teoría de la pangénesis*²⁵ sostenía que la herencia se transmitía por la mezcla de fluidos corporales producidos por los padres, y que una vez mezclados estos no se podían separar. Fruto de esta idea es la creencia de que la herencia biológica se transmite por la sangre. Expresiones como "hijos de la misma sangre", "hermanos de sangre", "sangre real" etcétera corroboran esta teoría. Podríamos entonces formalizarla de la siguiente manera:

Observación: los hijos se parecen a sus padres no sólo físicamente sino en ciertas actitudes y aptitudes.

Hipótesis: la herencia se transmite por la sangre.

Corroboración (fase experimental): Los hijos poseen características intermedias con respecto a las características de sus progenitores. Por ejemplo, si el

25. Teoría defendida por Anaxágoras, Demócrito y los tratados hipocráticos según la cual cada órgano y estructura del cuerpo producía pequeños sedimentos llamados gémulas, que por vía sanguínea llegaban a los gametos. El individuo se formaría gracias a la fusión de las gémulas de las células (Wikipedia).

padre es alto y la madre baja, el hijo tiene una estatura entre estas dos; Las familias de genios (Los Bach, Los Strauss, los Huxley...).

Anomalías: Hijos más parecidos a los abuelos que a los padres. Hermanos muy diferentes entre sí.

A pesar de los muchos ejemplos en contra de esta teoría y al no existir otra que pudiera reemplazarla, ella predominó por muchos siglos, y aún hoy es aceptada en la cultura popular.

La teoría de Mendel. Este investigador propuso que la herencia era transmitida por “caracteres”. Podríamos proponer las siguientes hipótesis utilizando el lenguaje moderno de la genética²⁶:

Hipótesis 1: La herencia se transmite mediante una “unidad de la herencia”: el gen.

Hipótesis 2: Cada individuo posee múltiples genes, uno por cada característica.

Hipótesis 3: Existen genes dominantes y genes recesivos.

Corolario: Un individuo se caracteriza por la fórmula ($Aa, Bb, Cc, \dots$) en donde A es el gen dominante y a el gen recesivo, correspondientes a una característica dada.

Definiciones:

Una raza es pura si siempre transmite el mismo tipo de gen (bien dominante, bien recesivo).

Reglas de operación:

- Un híbrido transmite tanto genes dominantes como recesivos.
- Los genes se combinan entre sí, independientemente.

“Teorema” 1:

La primera generación de razas puras sólo presentan las características dominantes de los progenitores.

Demostración:

Sea un padre de raza pura, de gen dominante A , y una madre, de raza pura, de gen recesivo b . Las fórmulas son: Padre (A, A) y madre (b, b) (por el corolario).

²⁶. Mendel llamó a las características fenotípicas, “caracteres” (el gen actual), y “elemento” a las entidades hereditarias separadas.

Las combinaciones posibles, de acuerdo a las reglas de operación son:

Es decir todos tienen la característica A como dominante.

Esta generación ya no es pura: es híbrida.

“Teorema” 2:

Los hijos de razas híbridas transmiten el gen dominante en la relación 3:1.

Demostración:

De acuerdo con las reglas de operación, las combinaciones posibles de un padre (A,a) y una madre (A,a) son:

El gen dominante está en tres de los cuatro casos. El modelo explica:

- La semejanza en algunos rasgos entre padres e hijos.
- La semejanza en algunos rasgos entre nietos y abuelos.
- La enorme diversidad de las características de los seres vivos.

Esta teoría explica los mismos hechos que la de la sangre y, a su vez, resuelve las anomalías encontradas en la primera; por esta razón, la reemplaza. Aquí sólo hemos indicado una pequeña parte de ella con un ejemplo muy sencillo: dos genes. A medida que el número de genes crece, la matemática utilizada es más compleja.

La tabla de la figura 2.4 muestra la variedad entre híbridos, de acuerdo con el número de genes diferentes que pueda tener cada padre²⁷.

Es bueno aclarar que los últimos avances en biología sobre genética molecular han creado herramientas poderosas para la comprensión y manejo de la herencia. No obstante la teoría de soporte sigue siendo el modelo de Mendel.

27. El número de genes del ser humano es aproximadamente de 25.000.

Genes diferentes	Variedad entre híbridos
1	2
2	4
3	8
...	...
20	> 1 millón
30	> mil millones

Número de genes y su variedad

Fig. 2.4

A la luz de la teoría moderna podemos decir que la “Genética Mendeliana” se ocupa de marcadores fenotípicos o morfológicos (genotipo y ambiente). La “Genética molecular” se ocupa de marcadores moleculares: miden las diferencias entre individuos de una población con base en el ADN, diferencias sólo entre los genotipos, con exclusión del ambiente.

Sea esta la oportunidad de enfatizar entre la diferencia de un enfoque lineal, y uno no lineal.

A mediados del siglo pasado, la interpretación del gen era lineal. Siguiendo a Capra & Luisi podríamos resumirla como sigue.

Los constituyentes esenciales de las células vivas son las proteínas y los ácidos nucleicos (DNA, RNA). las células contienen unos agentes llamados enzimas que catalizan reacciones químicas específicas. Las reacciones fundamentales son las mismas para cualquier organismo vivo. Pauling, Watson, Crick logran descubrir la estructura del DNA, el material genético en los cromosomas. Las funciones fundamentales del DNA son la autorreplicación y la síntesis de las proteínas. Se descubre cómo la información genética está codificada, con las mismas sustancias químicas, en los cromosomas.

Lo anterior lleva a un *determinismo genético*: El gen determina los rasgos biológicos y el comportamiento.

La “ecuación” lineal se ilustra en la figura 2.5.

En la actualidad esta interpretación se considera muy simplista. "Ya no somos nuestros genes".

Gen → especifica la enzima → cataliza el proceso

DNA → RNA → proteínas (enzimas) → rasgos biológicos

Determinismo genético: del DNA a los
rasgos biológicos

Fig. 2.5

Si bien un sólo gen puede "expresar" (inducir la síntesis de) una proteína, cualquier función compleja está determinada por un gran número de proteínas, por lo que es necesario considerar una red de genes y proteínas, interconectadas entre sí. Por otra parte hay cambios hereditarios en la función de los genes que pueden ocurrir sin modificación alguna de la secuencia del DNA de los mismos. Es el campo de la *epigenética* (M. Mitchel, 2009, p. 275).

Sin profundizar más, la propuesta actual de cómo funciona la relación entre organismos y genes toma una estructura no lineal. La figura 2.6 da una idea al respecto.

No linealidad de las relaciones gen-organismo

Fig. 2.6

2.2.2 Ejemplos en las ciencias humanas

Como complemento del tema, indicaremos algunos ejemplos de hipótesis en ciencias humanas.

I En 1798 Thomas R. Malthus, economista Inglés, publicó el libro Ensayo sobre el principio de la población (1998, reimpresión). Él estableció tres hipótesis:

- El alimento es necesario para la vida del hombre.
- La pasión entre los sexos es indispensable y se mantendrá siempre aproximadamente tal como es en la actualidad.
- La naturaleza es escasa y restringe el crecimiento.

Las hipótesis 1 y 2 implican crecimiento. El crecimiento de la población es infinitamente superior al poder de la tierra para producir alimentos: él obedece a una progresión geométrica, mientras que la capacidad de la tierra a una progresión aritmética.

La conclusión es clara: llegará un momento en el cual la humanidad no podrá disponer de alimento para su subsistencia. Su teoría ha creado mucha discusión. La humanidad, a través de la *revolución verde*, ha podido incrementar la producción de alimentos en gran medida; por otro lado, la tasa de crecimiento poblacional ha decrecido. Sin embargo, en la actualidad se observa la escasez de alimentos en muchas poblaciones del planeta. El crecimiento poblacional ha sobrepasado la capacidad de producción de alimentos tal y como Malthus lo había predicho. En el APÉNDICE numeral A.7.2 se estudian con cierto detalle estos tipos de crecimiento.

II David Ricardo postuló en el campo de la economía (Reale y Antiseri, 1999, p. 284):

- Únicamente el trabajo manual es productivo, ya que crea bienes materiales que poseen un valor objetivo intercambiable.
- Los científicos, los políticos, los gobernantes, los profesores, en definitiva, todos los productores de bienes inmateriales, "*quae tangere non possumus*", sólo colaboran indirectamente en la formación de la riqueza nacional, por lo cual la riqueza de una nación será tanto más grande cuanto menor sea el mundo de los ociosos.

- Se alcanza la cumbre de la sabiduría cuando el Estado, dejando libre a cada individuo para que consiga el máximo de bienestar personal, asegure automáticamente el máximo bienestar a todos los individuos.

Estas hipótesis sostuvieron por cerca de 150 años la teoría económica del mundo occidental. John F. Nash rebatió la tercera hipótesis reformulando la teoría económica, por lo cual logró el premio Nobel de economía (compartido) en el año de 1994.

III En el campo del derecho, Cesar Lombroso sostenía que (hipótesis):

- Los criminales no delinquen por un acto consciente y libre de voluntad perversa, sino porque tienen tendencias perversas, tendencias cuyo origen está en una organización física y psíquica diferente a la normal”.

De aquí se desglosa toda una teoría sobre el castigo: el derecho de la sociedad a castigar a los delincuentes no se basa en la responsabilidad o maldad del delincuente, sino en el hecho de que éste es peligroso para la sociedad; la ley le restringe las opciones para cometer el delito. Esto implicaría un tratamiento físico y educativo del delincuente muy diferente a la forma como se hace en la actualidad en muchos países.

¿Qué podríamos decir de la formalización en las Ciencias Humanas? Aquí la exigencia de un lenguaje con "reglas fijas de formación de expresiones y significados" parece imposible. El lenguaje matemático no es, por lo menos hasta la fecha, adecuado para tal ideal.

Se ha propuesto una formalización basada, no en el lenguaje de la matemática tradicional, sino en la simulación. A este respecto Gilbert & Troitzsch (2005, p. 5) comentan:

La matemática ha sido utilizada a veces como un medio de formalización en las Ciencias Sociales, pero esto no ha tenido gran acogida salvo, quizás, en algunas partes de la econometría. Hay varias razones de porqué la simulación es más apropiada que la matemática, para esta tarea (1966, Taber y Timpone). En primer lugar, los lenguajes de programación son más expresivos y menos abstractos que la mayoría de las técnicas matemáticas, por lo menos para aquellas accesibles a los no especialistas. En segundo lugar, los programas manejan mucho más fácilmente los procesos en paralelo y los procesos que no tienen un orden bien definido en sus acciones,

que los sistemas basados en ecuaciones matemáticas. En tercer lugar, los programas son (o pueden hacerse fácilmente) modulares, de tal manera que si se hacen cambios mayores en una parte, no es necesario modificar otras partes del programa; los sistemas matemáticos a menudo no poseen esta modularidad. Finalmente, es fácil construir sistemas de simulación que poseen agentes heterogéneos –por ejemplo, simular personas con diferentes perspectivas de su mundo social, diferentes niveles de conocimientos, diferentes competencias y aptitudes etc.– mientras que esto es generalmente difícil de hacer utilizando matemáticas.

2.3 Una clasificación de las ciencias

Otro criterio que nos puede ayudar para la definición provisional de ciencia, es el de su clasificación. Este tema se relaciona con lo expuesto más atrás sobre los tipos de conocimiento. Si no podemos decir qué es la ciencia, sí podemos decir que existen algunas áreas que no lo son. Por ejemplo, la religión y el arte son dos esferas fundamentales de la vida humana que no se encuentran en el ámbito científico, pues éste es tal porque se refiere a cosas o fenómenos particulares, objetivos, para describirlos, explicarlos, comprenderlos y además predecir nuevos comportamientos a través de métodos empíricos de los cuales se obtienen conclusiones que pueden ser replicadas por cualquiera que siga dichos procedimientos. En el caso de la religión, ésta se encuentra en el plano de la espiritualidad humana, de la creencia y la fe y su aceptación o no depende de que se crea o no en sus dogmas. Por ejemplo, la gravedad es, primero, un fenómeno natural y, segundo, responde a una ley que puede ser verificada. Dios no es un fenómeno natural. A él se accede por creencia y fe: no podemos establecer una ley natural de la cual se pueda inferir que Dios no existe. Algo semejante sucede con el arte, la magia o el misticismo: ninguna de éstas puede ser sometida a condiciones de experimentación y verificación objetivas.

Teniendo en cuenta lo anterior, recordemos las distintas clases de objetos y fenómenos: hay objetos y fenómenos de existencia real, hay objetos ideales y objetos y fenómenos culturales. Según esto, podemos hablar de *ciencias naturales* y *ciencias humanas*. Los objetos y fenómenos de las primeras son, obviamente, objetos y acontecimientos de existencia real, como por ejemplo, los eventos que ocurren en la materia y que son estudiados por la física, o las transformaciones, reacciones y combinaciones de las sustancias que son ob-

jeto de estudio de la química. Los objetos y fenómenos de los que se ocupan las segundas, son también de existencia real, pero circunscritos al fenómeno humano. Así la psiquis y el comportamiento son estudiados por la psicología. El hombre en su condición tanto natural como social es el objeto de estudio de la antropología. Las ciencias humanas, pues, comparten las características fundamentales de las ciencias naturales: se ocupan de fenómenos cognoscibles; utilizan la observación controlada y una cierta experimentación; pueden describir y explicar fenómenos y buscar soluciones a fenómenos problemáticos. En conclusión, tanto a las ciencias naturales como a las humanas las podemos denominar ciencias empíricas.

¿Y la filosofía? Ella es un caso especial dentro de las distintas ramas del saber. La filosofía no puede ser entendida, claro está, como una ciencia en el sentido que hemos estado hablando aquí, aunque desde su nacimiento hasta la revolución científica ciencia y filosofía eran una sola cosa. A los naturalistas se les llamaba “filósofos naturales” y a la ciencia “filosofía natural”. La palabra “Ciencia” fue tomada del latín “Scientia” que significa conocimiento. Cualquier conocimiento razonado era calificado como “ciencia”. Recordemos en la Biblia cuando se previene a Adán de no comer del árbol que permite distinguir entre la “ciencia del bien y del mal”.

A partir de la revolución científica, el saber se fue “especializando”; los distintos objetos de estudio empezaron a aislarse para su mejor conocimiento. Así nacieron las distintas ciencias: la física, la química, la medicina, la psicología, etc. Sólo a partir de 1834, como indica Gould (2010, p. 246), el término “Scientist” (científico) –acuñado por William Whewell (1794-1866)– entra en escena para designar a la persona que practicaba lo que se denomina hoy como “método científico” (en ciernes, por esta época). Desde entonces, la filosofía no tiene un objeto de estudio definido, (como lo son las transformaciones moleculares de la materia, por ejemplo); puede ocuparse de fenómenos muy diversos e incluso de aquellos que no tienen una existencia real; de ahí que ella pueda dividirse en varias ramas. Así, tenemos la filosofía moral y política, la filosofía del arte, la filosofía de la existencia, etc. Se puede afirmar que la filosofía está ubicada allí donde la ciencia encuentra su límite: en la metafísica, entendiendo por esta, y desde la perspectiva kantiana, el estudio de los aspectos de la realidad que son inaccesibles a la investigación científica; en otras palabras, aquello que por principio escapa a toda posibilidad de ser experimentados sensiblemente. Es la cosa-en-sí, es un objeto no fenoménico que pertenece a una intuición intelectual, no a una intuición sensible.

Ahondando un poco más en el tema, una de las tareas de la filosofía en el campo de la ciencia es considerar los conceptos que ésta utiliza y analizarlos con el fin de tratar de delimitar su significado exacto y sus mutuas relaciones. Como bien lo dice C.D. Broad (1963, p. 18):

Repetimos que esta tarea de esclarecer el significado y determinar las relaciones de los conceptos fundamentales no la realiza en absoluto ninguna otra ciencia. La Química *utiliza* la noción de Substancia, la geometría la de Espacio y la Mecánica la del Movimiento. Mas presuponen que uno ya sabe lo que significa *substancia, espacio y movimiento*. Así actúan de manera vaga y no se preocupan de penetrar, más de lo que requieren sus propios objetivos especiales, en el significado y relaciones de estos conceptos como tales. Naturalmente, las ciencias especiales esclarecen en cierta medida el significado de los conceptos que utilizan. Un químico, con la distinción que hace entre los elementos y los cuerpos compuestos, y con las leyes de combinación que utiliza, tiene una idea mucho más clara de lo que es la substancia que un simple lego. Sin embargo, las ciencias especiales sólo discuten el significado de sus conceptos en la medida que esto es necesario para sus propios propósitos. Para ellas aquella discusión es incidental, mientras para la Filosofía es esencial, ya que trata tales cuestiones en beneficio de las mismas.

Este tipo de análisis corresponde a una rama de la filosofía que se conoce como “Filosofía de la ciencia”. Ella se ocupa de reflexionar acerca de algunos problemas conceptuales que la ciencia presenta tales como su naturaleza, los criterios de verdad de una teoría, los métodos, la relación ética-investigación científica, etc. En este proceso la experimentación no tiene cabida ya que sería completamente inútil. “Ningún experimento esclarecerá las ideas respecto al significado de proceso en general y substancia en general” (Broad, *Op. Cit.* p.20). Los experimentos se basan en suposiciones que la filosofía debe esclarecer. Sin embargo, como puede observarse, muchos de los resultados de la ciencia se convierten en contenido para la filosofía con el fin de reflexionar sobre el mundo.

Actualmente en el campo de la filosofía de la ciencia se destacan dos vertientes: una que se ocupa de la *filosofía general de las ciencias* y otra que se conoce como *filosofía de las ciencias especiales*. La primera trata de asuntos relacionados con la explicación científica, la inducción y deducción, los aspectos de la inferencia probabilística, la causalidad, el realismo científico y la metafísica de las ciencias, el progreso científico, el reduccionismo y la emergencia sistémica; la

segunda, de problemas filosóficos de la lógica, de las matemáticas, de la física, de la biología, de la medicina, de las ciencias sociales, de la economía, de las ciencias cognitivas, de la lingüística (A. Barberousse *et al*, 2011).

Como puede deducirse de lo hasta ahora discutido, nuestro pensamiento está regido por la necesidad de encontrar explicaciones nuevas basadas en conceptos ya conocidos. En la lógica matemática, esta secuencia se interrumpe con el concepto de axioma y postulado. Ya no es necesario ir más allá. La veracidad del inicio está asegurada. Pero ¿qué ocurre con la ciencia? Si el conocimiento del mundo se fundamentara sólo en el conocimiento empírico, cada principio, cada inicio de una cadena de explicaciones requeriría de una justificación empírica, haciendo la cadena interminable. El asunto se resuelve con principios *metafísicos*. Recordemos que "Físis" (φύσις) significa "naturaleza", el mundo que nos rodea, el mundo sensible. Por su parte, "Metafísica" (μετά τὰ φυσικά) es "lo que está más allá de la naturaleza". De esta manera, los conocimientos científicos descansan en principios metafísicos, que son fundamentales como elemento de partida del pensamiento científico.

Skyttner nos da una idea al respecto. He aquí algunos de estos principios:

- La Naturaleza es predecible, y no reservada, está al alcance del conocimiento humano y está gobernada por leyes universales por lo que una teoría basada en un universo caótico es impensable.
- Las leyes son de distinto alcance: unas universales, otras circunscritas a nuestro planeta.
- La Naturaleza es computacionalmente reversible: pasado y futuro están a nuestro alcance cognitivo.
- Los experimentos siempre arrojan los mismos resultados, independientes del tiempo y el lugar, si se respetan las condiciones bajo las cuales fueron diseñados. Las mismas reglas de la creación del universo son aplicables para la explicación de la mente humana (principio de congruencia). La Naturaleza es ciega, no tiene metas o propósitos. Esto le da sentido al experimento en el laboratorio.

Para nuestra discusión, llamaremos "ciencia" únicamente a las *ciencias empíricas* (las ciencias de la naturaleza y las ciencias del hombre como lo indicamos anteriormente), excluyendo de tal clasificación a la filosofía, la matemática, la religión y el arte. La función primordial de la ciencia es el establecimiento de leyes generales de los fenómenos empíricos de los que se ocupa, a la manera

como Auguste Comte la definió. En las ciencias que tienen un desarrollo muy elevado (por ejemplo la física), las leyes forman jerarquías que permiten establecer esquemas lógico-deductivos. En su estado inicial una ciencia establece leyes que son generalizaciones clasificatorias como, por ejemplo, en el caso de la biología cuando se dice que las ballenas son mamíferos, lo cual permite la generalización de una cualidad común a las ballenas y que las diferencia del resto de habitantes del mar.

Podemos asegurar que en la actualidad la clasificación de las ciencias es cada vez menos tajante. En realidad, la nueva manera de investigar hoy el mundo, ha obligado a pensadores, científicos, tecnólogos y filósofos a renunciar a la idea de clasificaciones tan rígidas. La realidad se muestra hoy de una complejidad tal, que es necesario estudiar los distintos problemas y fenómenos teniendo en cuenta sus interrelaciones con otros. A manera de ilustración, podemos pensar en los problemas ambientales que vive la totalidad del planeta. Estos problemas no pueden estudiarse desde una sola perspectiva. Un problema como el de la contaminación de los ríos no puede solucionarse solamente con la intervención de los expertos en química porque en él influyen además factores económicos, políticos y culturales que deben tenerse en cuenta cuando del estudio y la solución se trata. Actualmente se habla de *biofísica*, *mecatrónica* y *astrofísica*, así como de *bioingeniería*, *bioinformática*, *redes neuronales*, *neuroeconomía* etc. Esto nos muestra que las fronteras entre las distintas ciencias se hacen cada vez más difusas y que las clasificaciones esquemáticas hoy, son anacrónicas.

En conclusión, hasta finales del siglo XIX la ciencia estaba dividida en varias ramas debido a la especialización que requirieron los distintos objetos de estudio. Esta tendencia no fue exclusiva de la ciencia; situación igual se presentó en la ingeniería, las artes, la medicina, las humanidades. En este período el método tuvo un carácter reduccionista, es decir, de explicación por partes, el cual se mostró insuficiente durante las primeras décadas del siglo XX. Los científicos se vieron en la necesidad de cambiar su concepción acerca del mundo y de buscar métodos más interdisciplinarios que dieran cuenta de la complejidad de los fenómenos, de sus distintas interrelaciones y de la responsabilidad humana en ellos. Así nace la cibernética, la Teoría de la Información, el Análisis de Sistemas, la Teoría General de Sistemas y la Teoría de la Complejidad. Estas dos últimas intentan, desde diferentes perspectivas, encarar los sistemas complejos. Es por esta razón que para fines metodológicos la Teoría General de Sistemas (T.G.S.) tiene en cuenta otra forma de clasificación de las cien-

cias, más general y por ello mismo más flexible: se trata de las *ciencias duras* (ciencias naturales) y las *ciencias blandas* (las ciencias humanas)²⁸.

Junto a esta clasificación se desarrolló el concepto de *interdisciplina*, a lo cual nos referiremos en el siguiente capítulo. G. Klir (1985, p. 6) ha propuesto el siguiente esquema que permite diferenciar lo que es un “conocimiento vertical”, identificado por disciplinas, y uno “transversal” que correspondería a la interdisciplina (ver figura 2.7).

Por lo expuesto hasta aquí, la definición de “ciencia” no es una tarea fácil. No poseemos herramientas que nos permitan asegurar de una manera rigurosa e inequívoca si en un momento una teoría pertenece o no al campo de la ciencia. En este sentido, la comunidad científica es bastante conservadora. Se puede negar la validez de una teoría ya que esto no compromete en mucho el que ella llegue después a ser considerada como tal, pero no es fácil aceptar desde sus comienzos el carácter científico de un conocimiento. Éste será reconocido por la misma comunidad científica después de cuidadosos análisis.

2.4 ¿Qué entendemos, entonces, por ciencia?

Hay un grupo de filósofos modernos que se han ocupado del tema. Entre ellos vale la pena destacar a Karl Popper, Thomas Khun y Paul Feyerabend

2.4.1 La ciencia en K. Popper

La idea de ciencia, en Popper, está determinada por algunos conceptos como los de falsación (por oposición al de verificación) y de deducción, por oposición al de inducción. Se trata de demarcar, es decir de diferenciar lo que es ciencia de lo que no lo es. Para ello, Popper adelanta una crítica al principio de inducción como procedimiento científico: no podemos aceptar principios generales, a partir de casos particulares, tal como lo han admitido muchos

28. Respecto a esta división, Husserl propone el mundo de la *ciencia Natural objetiva* y el de la *ciencia natural subjetiva*. El primero se encarga de estudiar el mundo de la experiencia externa y el segundo cobija el de la interna. Husserl incluye en esta segunda división a la psicología; la desliga de su vínculo biológico o *psicologismo*. (J.M. López: *Husserl y la psicología*. Texto de circulación interna U.T.P.).

Clasificación por propiedades estructurales relacionales
Ciencia de los Sistemas

								Investigación sistemas generales																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Dos formas de clasificar las ciencias
Fig. 2.7

teóricos de la ciencia. Es importante anotar que este principio se basa en la uniformidad de la naturaleza: el curso de la naturaleza es uniforme (el Universo está gobernado por leyes; el futuro se asemeja al pasado)²⁹. De acuerdo con esto el principio de inducción puede conducirnos a la obtención de una conclusión general de alta probabilidad: si el sol sale todos los días por oriente, y así ha sido por milenios, se puede asegurar que existe una alta probabilidad que el sol salga mañana por el oriente. Para nuestro crítico, se trata de la inducción por repetición y enumeración: observaciones repetidas, pueden asentar una generalización que ha sido propuesta por una teoría. Así, “la lógica del descubrimiento científico sería idéntica a la lógica inductiva, es decir, al análisis lógico de procesos inductivos” (Popper, 1968 p.27).

¿Por qué este tipo de inducción no tiene validez? Porque ninguna cantidad de observaciones puede fundamentar de manera segura una generalización, ya que podría presentarse una sola observación contraria a las que se ha hecho. Famoso es, en este caso el ejemplo de los cisnes: ningún número de observaciones de cisnes blancos podrá establecer que todos lo sean, o que sea mínima la probabilidad de encontrar uno que no sea blanco³⁰. Por otra parte los conceptos en que se fundamenta la observación, están influidos por la teoría que los contienen. C. A. Pickover (2009, p. 36) establece el siguiente esquema del desarrollo del conocimiento científico. El procedimiento es claramente inductivo (figura 2.8).

Pero la crítica a la inducción hecha por Popper se extiende también a la inducción por eliminación. Se trata aquí de la idea de que eliminando las teorías falsas, podría imponerse, al fin, la verdadera. El principal argumento en contra, es, por un lado, que el número de teorías es infinito, y por otro, que el número de soluciones “lógicamente posibles” para cada problema, también lo es.

A partir de esta crítica podemos ver hacia donde se dirige Popper con el criterio de falsación. Este criterio, que básicamente es uno de demarcación, nos afirma que una teoría para ser científica debe ser falsable, esto es, que debe ser posible demostrar que está equivocada. En este sentido, no se trata únicamente de su verificación; en realidad la falsación es un concepto opuesto al de verificación. La falsación no busca hechos y predicciones que verifiquen o confirmen la

29. Este axioma no soporta un análisis lógico, pues es circular; inducciones particulares justifican la inducción, la cual a su vez justifica las inducciones particulares: “El fuego quema” porque siempre quema.

30. Por ello causó tanta sensación el descubrimiento, en Australia, de cisnes negros. (Cygnus Atratus).

Proceso de la formación de una teoría

Fig. 2.8

teoría, sino hechos que la desmientan o predicciones que no se cumplan. ¿Cómo se corrobora entonces una teoría? Cuando todos los esfuerzos por falsarla ¡fracasen!

El principio de falsación, contrario al de inducción, tiene un soporte lógico. Si bien no podemos aceptar como propuesta teórica la repetición observada de hechos experimentales, sí podemos rechazar, a partir de una observación contraria, una propuesta teórica. A. F. Chalmers (2009, p. 61) comenta:

Hé aquí algunos ejemplos de afirmaciones simples que son falsables en el sentido deseado:

1. Los miércoles nunca llueve.
2. Todas las sustancias se dilatan al ser calentadas.
3. Los objetos pesados, como por ejemplo un ladrillo, caen directamente hacia abajo al ser arrojados cerca de la superficie de la tierra si no hay algo que lo impida.
4. Cuando un rayo de luz se refleja en un espejo plano, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

La observación (1) es falsable porque se puede falsar al observar que llueve un miércoles. La afirmación (2) es falsable; se puede falsar mediante un enunciado observacional en el sentido de que una sustancia x no se dilató al ser calentada en el tiempo t . El agua cerca de su punto de congelación servirá para falsar (2). Tanto (1) como (2) son falsables y falsas. Por lo que sé, las afirmaciones (3) y (4) pueden ser verdaderas. Sin embargo son falsables en el sentido deseado. Lógicamente es posible que el siguiente ladrillo que se arroje “caiga” hacia arriba. No hay ninguna contradicción lógica

implícita en la afirmación “El ladrillo cayó hacia arriba al ser arrojado” aunque puede ser que la observación nunca justifique semejante enunciado. La observación (4) es falsable porque se puede concebir que un rayo de luz que incida sobre un espejo formando un ángulo oblicuo pueda ser reflejado en dirección perpendicular al espejo. Esto no sucederá nunca si la ley de reflexión resulta ser verdadera, pero si no fuera así, no habría ninguna contradicción lógica. Tanto (3) como (4) pueden ser falsables, aunque puedan ser verdaderas.

A renglón seguido, Chalmer nos ilustra con ejemplos de afirmaciones que no son falsables:

- “O llueve o no llueve” no es falsable porque no puede refutarse lógicamente a partir de una observación.
- El siguiente ejemplo es sacado de un horóscopo: “Es posible tener suerte en la especulación deportiva”. La frase es válida tanto si se apuesta, como si no.

¿Qué es, pues, la ciencia para Popper? Podríamos decir que la ciencia busca la verdad, pero ésta no se predica de los hechos sino de las teorías. Lo anterior significa que una teoría será verdadera cuando se corresponda con los hechos, de tal manera que la ciencia busca teorías cada vez más cercanas a la verdad. Sin embargo ¿qué es la verdad? No existe un criterio para determinar con absoluta seguridad la verdad de una teoría (¡incluso si la encontráramos!). De ahí que Popper afirme que la verdad es más bien un “ideal regulador”. De esta manera, la ciencia consiste en un proceso de aproximación “eliminando los errores de las teorías precedentes, y sustituyéndolas por teorías más verosímiles” (Reale y Antiseri, 1999, Tomo 3, p.896).

La actividad del científico debe consistir en una permanente falsación de sus teorías y no simplemente en su verificación y ajuste de anomalías del *paradigma* vigente, lo cual conduce a la rutina, a la ineficacia y, en últimas, al estancamiento de la ciencia. Por paradigma se entiende la teoría que es considerada confiable hasta ese momento. La ciencia es, pues, la búsqueda de nuevos paradigmas (rupturas epistemológicas, las denomina Bachelard) y no el ajuste, ante las anomalías no explicadas, de una teoría vigente. Es dudoso que en la práctica, esto sea lo que hacen los hombres de ciencia. No es fácil tratar de falsar su propia teoría, aunque sí es común falsar las teorías de científicos rivales (Sokal, 2010, p. 240-).

Sokal (*Op. Cit.* p. 247-248), criticando a Popper, específicamente en su intento de establecer unas reglas generales del proceder científico, escribe:

Sin duda, la epistemología de Popper contiene algunas ideas válidas: el acento en la falsabilidad y la falsación es saludable, siempre y cuando no se lleve al extremo (por ejemplo, la refutación absoluta de la inducción). En concreto, si se comparan materias tan radicalmente diferentes como la astronomía y la astrología, hasta cierto punto resulta útil usar los criterios popperianos. Pero no tiene sentido pedir que las pseudociencias sigan normas estrictas que ni siquiera los científicos cumplen al pie de la letra.

2.4.2 Los conceptos de T. Kuhn

Por su parte Kuhn, partiendo de la historia de la ciencia como elemento clave para la comprensión del desarrollo, justificación y validación de las teorías científicas, propone su concepción a través de las nociones de ciencia normal y ciencia extraordinaria ambas articuladas a la de paradigma (Kuhn, 1975).

De acuerdo con este filósofo, la comunidad científica es la que se crea alrededor de una teoría que es la dominante (un paradigma), al interior de la cual los miembros de dicha comunidad desarrollan sus investigaciones. Esto es lo que Kuhn llama *ciencia normal*. Los investigadores determinan cuáles son los problemas más significativos para el paradigma, llevando a cabo una permanente confrontación entre el paradigma y los hechos, ampliando su ámbito de dominio. Es decir, la ciencia normal supone una *continua* solución de rompecabezas para así mantener la vigencia de la teoría. Cuando no se encuentran soluciones a ciertas anomalías, no es la teoría la que es puesta en duda, sino el investigador. A medida que el campo de aplicación de la teoría se extiende, surgen anomalías que ya no pueden explicarse por el paradigma, y éste entra en crisis. Aparece así el concepto de ciencia extraordinaria. Se trata de un período en el cual la teoría vigente es puesta en tela de juicio; y en el proceso de crítica y búsqueda se origina una revolución científica que da lugar al nuevo paradigma. Sobre la base de este nuevo modelo se iniciará, otra vez, el período de ciencia normal.

En estas revoluciones hay pues, un cambio de visión de mundo. Sin embargo, los paradigmas en oposición permanecen vigentes simultáneamente durante cierto tiempo. Así aconteció con las teorías de Ptolomeo y Copérnico respecto

a nuestro sistema planetario y con las de Newton y Einstein en lo referente a la concepción de la mecánica.

Es importante resaltar que un paradigma no refleja únicamente conceptos y técnicas, sino también valores. El investigador no sólo es responsable intelectualmente sino moralmente. Esta observación de Kuhn pone en cintura a aquellos que han intentado separar la acción investigativa de las consecuencias que esta pueda traer.

Las anomalías pueden considerarse falsaciones pero no en la forma radical que propone Popper, ya que, a su vez, estas falsaciones son condiciones para la aparición de nuevas teorías que las eliminan.

Tenemos pues, una diferencia de conceptos: Popper aboga por la revolución permanente como lo distintivo de la ciencia, mientras que Kuhn la distingue fundamentalmente por su fase de normalidad.

Es importante resaltar que ambos autores, pese a las diferencias, coinciden en varios puntos de interés para la ciencia. Kuhn lo ve de esta manera:

En casi todas las ocasiones en que Sir Karl y yo nos dirigimos explícitamente al mismo problema, sus puntos de vista acerca de la ciencia y los míos son muy aproximadamente idénticos [...] Ambos rechazamos el punto de vista de que la ciencia progresa por acumulación; en lugar de ello ambos ponemos el énfasis en el proceso revolucionario mediante el que una vieja teoría es rechazada y sustituida por una nueva, incompatible con ella, y ambos subrayamos con fuerza el papel en que en este proceso juega el eventual fracaso de la vieja teoría en hacer frente a los desafíos que le dirigen la lógica, la experimentación o la observación. Por último, Sir Karl y yo estamos unidos en oposición a algunas de las tesis más características del positivismo clásico [...]; y los dos insistimos en que los científicos pueden con toda propiedad tratar de inventar teorías que expliquen los fenómenos observados y lo hagan en términos de objetos reales, cualquiera que sea el significado que esta última frase pueda tener. (Lakatos & Musgrave, 1975, p.81).

2.4.3 P. K. Feyerabend y el método

A su vez Feyerabend considera el proceso del desarrollo científico por encima de su estructura. Igual que Kuhn, destaca la importancia de la historia de la

ciencia como herramienta fundamental para la filosofía y comprensión del quehacer científico.

Feyerabend habla de una “teoría anárquica del conocimiento”. Señala la imposibilidad de que un número dado de reglas pueda ser capaz de explicar todas las interacciones que surgen en el proceso histórico de la ciencia. Tales reglas deberían llevarnos como de la mano, evitando caer en errores. Sin embargo, el error debe ser parte del proceso científico. Debemos aprender a reconocerlo y a convivir con él y utilizarlo para mejorar la teoría. Anota Feyerabend (1975, p. 15):

La idea de un método que contenga principios científicos, inalterables y absolutamente obligatorios que rijan los asuntos científicos entra en dificultades al ser confrontada con los resultados de la investigación histórica. En este momento nos encontramos con que no hay una sola regla, por plausible que sea, ni por firmemente basada en la epistemología que venga, que no sea infringida en una ocasión o en otra. Llega a ser evidente que tales infracciones no ocurren accidentalmente, que no son el resultado de un conocimiento insuficiente o de una falta de atención que pudiera haberse evitado. Por el contrario, vemos que son necesarias para el progreso. Verdaderamente, uno de los hechos que más llama la atención en las recientes discusiones en historia y filosofía de la ciencia es la toma de conciencia de que desarrollos tales como la revolución copernicana o el surgimiento del atomismo en la antigüedad y en el pasado reciente (teoría cinética, teoría de la dispersión, esteroquímica, teoría cuántica) o la emergencia gradual de la teoría ondulatoria de la luz ocurrieron bien porque algunos pesadores “decidieron” no ligarse a ciertas reglas metodológicas “obvias”, bien porque las “violaron involuntariamente”.

Este autor considera que tal práctica liberal, no es meramente un hecho de la historia de la ciencia, sino que es una necesidad para el desarrollo del conocimiento.

Esta libertad debe ser amplia. Hay que bajar a la ciencia y a la razón del pedestal en que han sido puestas. Este privilegio ha inmovilizado los impulsos creadores del ser humano. Ninguna teoría debe ser considerada como privilegiada. Debemos apostarle al pluralismo, a las alternativas, y por sobre todo, a la libertad. Los mitos y la metafísica son alternativas para la ciencia y pueden proporcionar un conocimiento que no esté contenido o aún sea negado por ella.

2.5 Consideraciones finales

Podríamos intentar entonces una síntesis y definir ciencia como el conocimiento adquirido a través de un proceso basado en un razonamiento bien sea de tipo inductivo o deductivo; debe ser lo más objetivo posible. En su fase más elaborada debe ser expuesto a la comunidad internacional en forma de un esquema formal, en lo posible deductivo, soportado por resultados experimentales. La teoría en cuestión no sólo debe explicar un amplio rango de fenómenos típicos de su interés, sino de predecir otros fenómenos no observados directamente. Tales comprobaciones deben poder ser realizadas por cualquier persona que conozca la teoría y disponga de los experimentos en las situaciones descritas por la misma. Si tal predicción no es posible (recordar el capítulo anterior) debe al menos explicar coherentemente los fenómenos observados. El lenguaje utilizado debe ser de la mayor precisión posible, siendo el ideal el lenguaje matemático.

Pero si estuviéramos obligados a dar una definición “concisa”, deberíamos decir que ciencia es lo que aceptan como tal los hombres de ciencia. En el fondo, ellos deciden cuándo una teoría puede considerarse o no como científica. La historia de la ciencia está llena de ejemplos pertinentes a este respecto.

En forma coloquial, Bly (2010, p. *xii*) nos dice lo que es ser un científico:

... porque alguna vez todos hemos sido científicos. [...] Si Ud. desea conocer cómo vuela una mariposa, Ud. la examina. Observa que tiene alas: dos delanteras, dos posteriores, cada par adherido a diferentes partes del cuerpo. Una hormiga no tiene alas, y un escarabajo parece no tener ninguna... pero las tiene, ocultas bajo una caparazón dura. Si Ud. quiere aprender más, Ud. consulta un libro de biología. Comienza a adicionar información, a observar con más cuidado, haciendo hipótesis más sustanciosas, y realizando experimentos. Y Ud. lo hace porque quiere hacerlo, porque comienza a sentir que es extremadamente gratificante. Y cuando Ud. empieza a comprender algo, y a realizar conexiones, viendo relaciones y dependencias, y a aplicar estos conocimientos... entonces un circuito de vehículos comienza a parecerse a una horda de hormigas en busca de comida.

Terminemos este capítulo con la acotación de Brigman (1950, p. 301):

No existe un método científico como tal, pero la característica más vital de todo procedimiento científico ha sido siempre realizarlo con toda la potencia de la mente, sin poner barreras. Esto significa que no deben existir privilegios especiales acordados por la autoridad o la tradición, que se ha de tener especial cuidado en evitar los prejuicios personales y las predilecciones, que continuamente ha de comprobarse si se está cometiendo algún error, y que debe seguirse cualquier línea de investigación que parezca prometedora. Todas estas reglas son aplicables a cualquier situación de la que se quiera obtener una respuesta adecuada y no son sino manifestaciones de inteligencia.

2.6 Resumen

El capítulo se inicia con el concepto de formalización de la matemática, ya que esta posee un procedimiento razonado para justificar conclusiones verdaderas a partir de premisas verdaderas: los axiomas y los postulados. Mediante el silogismo se garantiza la verdad o falsedad de una proposición. Sin embargo, es necesario hacer énfasis en el hecho de que un contraejemplo derriba completamente todo el sistema formal que haya sido propuesto. En este mismo sentido, se destacó la importancia de la depuración del lenguaje matemático al separar el lenguaje objeto del metalenguaje.

La ciencia clásica intentó reproducir este procedimiento, pero encontró serias dificultades. Son varias las características que diferencian la formalización de un conocimiento científico, de uno matemático ya que no se puede hablar, para el caso de hechos reales, de axiomas y postulados. Estos deben ser reemplazados por el concepto de hipótesis, las cuales deben ser comprobadas en su veracidad. Aquí se destaca la importancia del experimento. Tampoco un contraejemplo (una anomalía) destruye la teoría. Toda teoría tiene anomalías que se deben intentar solucionar; el paradigma, en lo posible, debe mantenerse. Cuando esto no es posible, se rompe el paradigma y aparece lo que se conoce como una revolución científica.

Los ejemplos relativos a la física, a la biología y a las ciencias sociales que el lector encuentra aquí, ilustran el poder de la formalización, y las limitaciones a las que ella debe enfrentarse.

Discutimos el concepto “clasificación de las ciencias”. Las dificultades que en el mundo actual se imponen a tal intención, muestran la importancia de la interdisciplina y la necesidad de otro tipo de consideración más global a la cual hemos llamado “pensamiento sistémico” la cual estudia todos integrados que denominamos *sistema*.

Nos hemos referido a las opiniones de K. Popper, T. Kuhn y P. Feyerabend acerca al concepto de ciencia, el cual que ha sido el nódulo central de los capítulos 1 y 2.

También indicamos que las teorías científicas son sólo aproximadas y que su aceptación como tal requiere de un proceso difícil y tortuoso, al que es sometido por la comunidad científica reconocida en el momento, todo hombre de ciencia.

CAPÍTULO 3

LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

3.0 Aislamiento. Reduccionismo

Como lo mencionamos en el capítulo 1, en el procedimiento tradicional de la ciencia existe, entre otras características, una manera muy particular de estudiar los fenómenos. Galileo lo llamó *resolución*: consiste en aislar el objeto de estudio, de tal manera que sólo se tienen en cuenta las variables fundamentales, las cuales lo explicarán en su totalidad. La física clásica, así como la química y otras ciencias lograron encontrar los tipos de fenómenos que permitían este tratamiento. Un ejemplo es el péndulo ilustrado en la figura 1.1 (Cap. 1).

Otro buen ejemplo es el movimiento, estudiado por Galileo, de un proyectil lanzado horizontalmente. La figura 3.1 muestra este caso (Holton, 1975, p. 135-138).

Lanzamiento horizontal de una esfera

Fig. 3.1

Una esfera pequeña es lanzada desde una mesa, mediante un fuerte impulso horizontal, con velocidad v_0 . La esfera describe una parábola durante su caída, la cual es el resultado de dos movimientos independientes: uno horizontal, uniforme, cuyo componente de velocidad es igual a la velocidad adquirida mediante el impulso inicial, en ausencia de fricción ($v_x = v_0$) y otro vertical equivalente a la caída libre, sin fricción, de la esfera. Puede demostrarse que la distancia total s recorrida desde el punto en el cual la esfera fue impulsada hasta su posición final, es:

$$s = \sqrt{(v_0 t)^2 + \left(\frac{1}{2} g t^2\right)^2} \quad (3-1)$$

en donde, como se indicó, v_0 es la velocidad con que sale la esfera debido al impulso inicial y t el tiempo utilizado en llegar a dicha posición. En este análisis sólo se ha tenido en cuenta el tiempo, la velocidad inicial y la constante gravitacional g (es decir la aceleración que la fuerza de atracción de la tierra ejerce sobre la esfera). Ninguna otra influencia es considerada.

Fue René Descartes quien sentó los fundamentos filosóficos de esta manera de enfrentar los problemas. En su conocido libro “El discurso del método” escribe, con relación al segundo y tercer precepto para adquirir conocimiento correcto (1983, p. 59):

El segundo, dividir cada una de las dificultades que examinase en tantas partes como fuera posible y como se requiriese para su mejor resolución. El tercero, conducir ordenadamente mis pensamientos, comenzando por los objetos más simples y fáciles de conocer para ascender poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los más complejos, suponiendo, incluso, un orden entre los que no se preceden naturalmente.

El primer paso es, pues, aislar el fenómeno del resto del universo como lo hizo Galileo cuando supuso que la única influencia válida en el movimiento del proyectil era el efecto de la tierra. El análisis es realizado en el vacío. El siguiente paso es estudiar en detalle las diferentes variables, en forma independiente. En otras palabras, subdividir el problema total en subproblemas, reduciendo así su complejidad tal y como él lo hizo con la velocidad. Cada subproblema será resuelto y si no es posible, entonces se subdividirá de nuevo, tantas veces como sea necesario hasta encontrar subproblemas resolubles. Galileo había estudiado el movimiento constante (velocidad horizontal) y la caída de los

graves (velocidad vertical). Cuando todas las componentes se hayan explicado, entonces se habrá solucionado el problema: la composición de ambas velocidades explican cómo se mueve la esfera siguiendo una parábola. Esto se conoce como *reduccionismo*. ¿Cómo podríamos llevar a cabo este procedimiento para estudiar una familia? ¿Será que la consideración independiente de sus partes: el padre, la madre, cada uno de los hijos, nos podrá explicar la complejidad de esta unidad social?

De alguna manera estas ideas indujeron a los hombres de ciencia a buscar elementos básicos a partir de los cuáles se pudiera construir todo el conocimiento de las diferentes ramas de la ciencia.

El éxito de esta forma de ver el mundo no se hizo esperar. Capra y Luisi (2014) en los dos primeros capítulos de su libro hacen un excelente recuento al respecto. Resumamos: la explicación del movimiento de los planetas del sistema solar, de los cometas, de las mareas; el movimiento de los fluidos, la vibración de los cuerpos elásticos; el calor, generado por el movimiento de átomos y moléculas; los fenómenos térmicos como la evaporación, la temperatura, la presión de un gas; la teoría atómica de la química que conceptualmente la une con la física: aparece la físico-química; en medicina la explicación del fenómeno de la circulación de la sangre, dada por Harvey, que era considerada como el problema más fundamental y difícil de la fisiología de todos los tiempos; la extensión de estas ideas a la sociología, la posibilidad de explicar a las sociedades a partir de individuos libres, que sin embargo, puedan tener comportamientos grupales estables, como ocurre con las moléculas de un gas.

En química los procesos reduccionistas son claros. Si queremos explicar la formación de la sal (cloruro de sodio, $NaCl$), por ejemplo, la siguiente reacción química indica el proceso:

Lo anterior puede realizarse en un laboratorio, en donde se aíslan las diferentes sustancias, del resto del universo. “Cerramos” (conceptualmente, aislamos) el sistema sodio, ácido clorhídrico.

En biología podemos tomar como ejemplo el estudio de una célula animal. Esta se separa del resto del organismo y podemos describirla con base en sus componentes (ver figura 3.2).

Estructura de una célula animal típica

1. Nucleolo, 2. Núcleo, 3. Ribosoma, 4. Vesícula, 5. Retículo endoplasmático rugoso, 6. Aparato de Golgi, 7. Citoesqueleto (microtúbulos), 8. Retículo endoplasmático liso, 9. Mitocondria, 10. Vacuola, 11. Citoplasma, 12. Lisosoma, 13. Centriolo.

Tomado de: <http://es.wikipedia.org>

Fig. 3.2

De hecho es posible establecer diferencias entre éstas células y las vegetales.

En psicología es común aislar a los individuos en laboratorios y someterlos a diferentes estímulos con el fin de sacar conclusiones generales sobre reacciones, respuestas y comportamientos ante diferentes situaciones.

Para el caso de la física se consideraba que la parte fundamental a la cual se reducían todos los objetos era el átomo. La molécula (o el mol según el caso) es la parte fundamental de los procesos químicos. En biología, la célula es el equivalente al átomo en la física. En sociología el individuo, la familia o la sociedad y en forma similar en otras áreas del conocimiento humano. Escuchemos a Poincaré (1914, p. 19-20) analizando esta idea cuando se refiere a los hechos que son de interés para el científico (los hechos simples por oposición a los complejos):

¿Pero dónde están los hechos sencillos? Los científicos han tratado de hallarlos en dos extremos: en lo infinitamente grande y en lo infinitamente pequeño. El astrónomo los ha hallado debido a que las distancias de las estrellas son inmensas, tanto que cada una de ellas aparece sólo como un

punto y las diferencias cualitativas desaparecen, y porque un punto es más sencillo que un cuerpo que tiene forma y cualidades. El físico por otra parte, ha visto los fenómenos elementales en la división imaginaria de los cuerpos en átomos infinitamente pequeños ya que las condiciones del problema, que sufre lentas y pequeñas variaciones cuando pasamos de un punto a otro del cuerpo, puede considerarse como constante dentro de cada uno de estos pequeños átomos. De manera similar el biólogo ha sido conducido instintivamente a considerar la célula como más interesante que el animal completo, y los hechos han comprobado que tiene razón, dado que las células que pertenecen a los más diversos organismos tienen más similitudes, para aquellos que pueden reconocerlas, que los organismos mismos. El sociólogo está en una posición más complicada. Los elementos, que para él son los seres humanos, son muy disímiles, muy variables, muy caprichosos, en otras palabras demasiado complejos en sí mismos. Por lo tanto su historia no se repite. ¿Cómo entonces seleccionar el hecho interesante de su repetición? Un método es la selección de hechos y en concordancia nuestro primer cuidado debe ser seleccionar uno. Muchos se han propuesto ya que el terreno está en disputa. Casi cada tesis social propone un nuevo método, que sin embargo su autor se cuida de aplicar, de tal manera que la sociología es la ciencia con el mayor número de métodos y los menores resultados.

Con respecto a la sociología y teniendo en cuenta la acertada observación de Poincaré relacionada con la inexistencia de hechos sencillos que le permitan establecer generalizaciones teóricas, se ha propuesto en la actualidad una alternativa, que es la base de la programación por agentes, en donde cada uno es diferente de los demás. En los capítulos relativos a la teoría de la complejidad se explicará en qué consiste este tipo de enfoque.

3.0.1 El concepto de modelo

Una primera idea es la de un modelo como una representación simplificada de un fenómeno “real”. Pero otra forma de verlos es la *suposición* de cómo es la “realidad”. Así, se cree que los científicos estudian la naturaleza pero lo que en general hacen es construir modelos de la naturaleza. Los ejemplos que hemos dado es una corroboración de este hecho.

Cuando Kant nos indica que lo que nosotros creemos que es el mundo es sólo una percepción, la conclusión con respecto a la ciencia es que ésta sólo puede

considerar el *cómo* es el objeto que estudia, mas nunca podrá conocer *qué* es dicho objeto.

¿Por qué se recurre a ellos? La ciencia estudia fenómenos complejos, fenómenos que no son fáciles de explicar sin un estudio profundo. Se hace necesario simplificarla y esto se logra a través de los modelos. Estos nos permiten darle sentido a lo observado en términos que son familiares para nosotros (es decir para aquellas personas que puedan conocer el significado de tales términos). También son medios para predecir el futuro (M. Mitchel, 2009, p. 210).

Existe un tipo de modelo que tiene gran trascendencia que serán usados a lo largo de este texto: los modelos ideales, a los cuales nos referiremos como *constructos mentales*. El péndulo, y el lanzamiento horizontal de Galileo son dos buenos ejemplos.

3.1 Mecanicismo

Poco tiempo después de la muerte de Descartes, en 1687 Newton publica su famosa obra *Principios matemáticos de la filosofía natural*, popularmente conocidos como los "*Principia*". En esta obra se explican las leyes fundamentales que rigen el movimiento en cualquier parte del Universo: es la mecánica celeste. Partícula, posición y fuerza: con estos tres conceptos los fenómenos del universo pueden ser descritos.

Esta tendencia a explicar los fenómenos naturales a partir de la mecánica newtoniana se conoce con el nombre de mecanicismo. Así la presión de un gas se explica por los choques de las moléculas que lo componen contra las paredes del recipiente que lo contiene, y la temperatura del mismo depende de la velocidad con que se mueven. Hamilton explica la óptica (el estudio de los rayos luminosos) no mediante la geometría, que fue la matemática utilizada para tal fin antes de 1827, sino mediante un análisis matemático riguroso, pasando del concepto de la "óptica de rayos" a la "óptica ondulatoria", cambiando la geometría por el álgebra y el análisis.

El mecanicismo tuvo como consecuencia inmediata que los estudios sobre los fenómenos relacionados con los seres vivos, los organismos, no estuvieran en las investigaciones fundamentales de la física. Como dice A. Rapoport (1968):

En la actualidad el concepto de organismo ha sido siempre fundamental en biología. Su exclusión de la física marcó el comienzo de la ciencia física moderna. Esta exclusión fue necesaria para liberar a la física de la mano muerta de la filosofía aristotélica con su énfasis en los determinantes teleológicos de búsqueda de metas del movimiento. En este marco de referencia, los filósofos explicaban la caída de una piedra por la “naturaleza” de la piedra y el ascenso del humo por la “naturaleza” del humo.

Rapoport destaca cómo en la visión aristotélica son fundamentales las causas finales: los cuerpos se mueven de acuerdo a su naturaleza, tienden hacia ciertos lugares. Esto se conoce con el nombre de “teleología”: finalidades planeadas por un agente externo al objeto que la posee. Por su parte Galileo enfatiza las causas eficientes.

Las disciplinas relacionadas con los seres vivos trataron de explicar los fenómenos que estudiaban mediante el mecanicismo. Para dar este paso, Descartes separa la mente (*res cogitans*) del cuerpo (*res extensa*): ahora el cuerpo podía considerarse como una máquina. De él podría ocuparse el mecanicismo.

Como ya se indicó el mecanicismo y el reduccionismo comienzan a influir otras áreas del conocimiento. En sociología, John Locke (1632-1704) comparaba el estado de equilibrio de los átomos de un gas en reposo con el comportamiento de los individuos en una sociedad estable; lo importante era descubrir las leyes naturales que lo regían para poder gobernar, en lugar de imponer leyes para forzar un cierto equilibrio social. En psicología, Theodor Fechner (1801-1887) desarrolló la psicofísica en la cual propuso leyes del comportamiento humano similares a las leyes de la física. En épocas más modernas en mercadotecnia se habla de la ley de la atracción de comunidades (a semejanza de la ley de atracción universal de las masas) estableciendo que la atracción que se ejercen entre dos poblaciones separadas por una distancia de tránsito entre ellas igual a d , es proporcional al producto de las poblaciones (número de habitantes) dividido por el cuadrado de la distancia d que las separa. Otro importante ejemplo en psicología es considerar el comportamiento humano únicamente como resultado de respuestas a estímulos. Los patrones sexuales y la codicia, entre otros, están relacionados con la hormona oxitocina. En el campo ambiental el estudio y descripción de los cambios extremos del clima en diferentes períodos geológicos (cambio de la polaridad de la tierra, períodos glaciales, calentamiento global...). La biología molecular...

El universo fue considerado como un gigantesco reloj, metáfora que permeó todas las ciencias. Por esta época fueron contruidos ingenios prodigiosos que podían imitar incluso movimientos humanos complejos, cuyo mecanismo interno era estructuralmente similar al de un reloj.

Un excelente ejemplo de mecanicismo es el pato de Vaucanson, ingeniero e inventor francés. La figura 3.3 es un esquema de dicho ingenio. Este pato graznaba, caminaba, comía y hacía la digestión de alimentos que le suministraban³¹.

El pato de Vaucanson

Fig. 3.3

Otra característica fundamental de esta mecánica es la de que el tiempo no tiene dirección, es decir, pasado, presente y futuro están referidos a un instante dado y no a un concepto absoluto.

Nada pasa, en la validez de los resultados, cuando en sus ecuaciones se cambia t por $-t$ ³². El principio de reversibilidad en física implica que los fenómenos físicos, y por lo tanto todos los fenómenos naturales, deben ser reversibles: en un sistema dado podemos pasar de un estado inicial a uno final y luego regresar al estado inicial sin necesidad de utilizar ningún tipo de energía diferente a la generada por el mismo sistema. Los desarrollos logrados han constatado la validez de este principio.

La reversibilidad es la base del determinismo científico, fundamental para la consideración de leyes en la naturaleza. Este determinismo puede reducirse a la

31. De http://automatas.cps.unizar.es/Historia/Webs/automatas_en_la_historia.htm

32. Para ampliar el tema remitimos al lector al APÉNDICE, literal A.3.1.

siguiente consideración: si se conocen las condiciones iniciales de un fenómeno, es posible conocer con exactitud su situación posterior, en cualquier instante de tiempo, con total precisión e igualmente podemos conocer su pasado.

De acuerdo con esto, ¿es posible, conociendo la situación actual de un ser vivo dado, predecir con exactitud su evolución? Para Laplace (1951, p. 13) el problema es sólo dominar un inmenso número de variables y conocer sus valores. Pero esto puede, aunque sólo sea en la imaginación, ser resuelto:

Debemos entonces considerar el estado actual del universo como un efecto de su estado anterior y como la causa de uno que le seguirá. En un instante cualquiera una inteligencia que pudiera comprender todas las fuerzas que animan la naturaleza y las situaciones respectivas de los elementos que la componen –una inteligencia lo suficientemente amplia como para someter estos datos al análisis– abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los grandes cuerpos del universo y los del átomo más liviano; para ella nada podría ser incierto y el futuro, así como el pasado estaría presente ante sus ojos. La mente humana nos ofrece, en la perfección que ha sido capaz de darle a la astronomía, una débil idea de tal inteligencia. Sus descubrimientos en mecánica y geometría, adicionales a la de la gravedad universal le han permitido comprender en la misma expresión analítica los estados pasados y futuros del sistema del mundo.

Sin embargo se oyen también voces en contra de esta visión. En primer lugar, dentro de la misma física, a pesar de los grandes éxitos logrados, surgen profundos fracasos: la explicación del electromagnetismo mediante el concepto de partícula y movimiento no es posible: aparece una fuerza nueva no descriptible por modelos Newtonianos. La “fuerza” es reemplazada por el “campo”, que no hace referencia a cuerpos materiales. Si se pudo explicar la circulación de la sangre, la explicación de los procesos digestivos mediante una visión mecanicista fue un gran fracaso: se necesitaban otros conceptos ya no de la física sino de la química. La teoría de la evolución de Lamarck y Darwin pone fin a la idea del mundo como máquina, de un mundo cartesiano perfectamente regulado y predecible. Ciento setenta y dos años después de la publicación de *Los principios*, en 1859, Charles Darwin entregaba su obra fundamental, “El origen de las especies”, en donde hacía un profundo estudio de la evolución de los seres vivos en nuestro planeta. Se destacan su propiedad de ser siempre cambiantes, que generan sistemas complejos a partir de otros más simples. Una tendencia

al orden y a la complejidad, con disminución de la entropía, contraria a la idea de la físico-química, de una tendencia al desorden, al aumento de la misma³³.

¿Cómo explicar la moral y la ética a partir de la genética?

La teoría de la evolución fue aceptada desde un principio (no así la teoría de la selección natural). Lo importante es subrayar que, según Darwin, los procesos de evolución de la vida son irreversibles, no puede devolverse. Incluso siempre ha sido evidente que los seres vivos envejecen, no vuelven a estados anteriores de juventud. Y son innumerables los procesos que tienen esta característica de irreversibilidad. Sin embargo la consideración del tiempo como un fenómeno reversible persiste.

Los sistemas ya no son predecibles, ya no hay “mecanismos de relojería” que permitan predecir el futuro y reconstruir el pasado. El mecanicismo abandona la idea mecánica, el mecanismo del reloj, pero conserva el principio de reducir todos los aspectos de los organismos vivos a intercambios físico-químicos de sus componentes más pequeñas. Mecanicismo y reduccionismo se funden en uno. Su lenguaje más depurado, las ecuaciones diferenciales.

Las reacciones no son sólo desde un punto de vista científico. En el siglo XVIII, como crítica al paradigma reduccionista-mecanicista, en la cual los seres humanos y la sociedad se explican de manera mecánica como sistemas perfectamente predecibles, surge un movimiento conocido como “romanticismo” liderado por un grupo de intelectuales especialmente filósofos y artistas que criticaron duramente esta manera de pensar³⁴. El universo y el hombre no podían ser entendidos como una máquina. El universo, la naturaleza y el hombre se encuentran conectados y hacen parte de un todo orgánico –no mecánico– y vivo. Las nociones de relación, desarrollo y proceso son las claves para comprender el mundo, reemplazando así la noción mecanicista de función³⁵, esa actividad particular que tiene cada órgano o sistema. La separación mente-cuerpo no tiene sentido. Somos un todo integrado.

33. En forma somera, digamos que la entropía mide la pérdida de la capacidad de realizar trabajo de un sistema. La energía libre, un concepto complementario, se refiere a la fracción de la variación total de energía que es capaz de realizar trabajo a medida que el sistema tiende al equilibrio. El tema de la entropía y de la energía libre se analizará en el capítulo cuarto, numeral 4.1.

34. Se destaca el romanticismo nacido en Alemania e Inglaterra, iniciado en la literatura pero que se extendió rápidamente a todo el pensamiento intelectual de la época.

35. Función implica diseño.

De alguna manera, la mirada se volvía hacia el pensamiento griego. Veamos algo al respecto.

3.2 Holismo

La concepción del mundo que tenían los griegos, contrasta fuertemente con la visión reduccionista y mecanicista que acabamos de describir. Los filósofos de la Grecia antigua creían que el universo era un todo integrado y que lo que acontecía en él era fruto de las diferentes interconexiones de los elementos que lo formaban. La palabra griega *holos* significa todo, entero, total³⁶.

En primer lugar, la tesis de que la tierra era el centro del universo (teoría geocéntrica diferente a la de la ciencia actual que es heliocéntrica, es decir, con el sol como centro del sistema planetario del que hacemos parte), tenía como fundamento destacar la importancia del hombre como la obra más perfecta de la creación. Este hecho además, estaba de acuerdo con la experiencia cotidiana por la cual se sabe que la tierra está en reposo y que son los planetas (el sol, la luna, etc.) los que giran alrededor de ella.

La materia, en el mundo sublunar, estaba formada por tierra, agua, aire y fuego (incluye la luz), los cuatro elementos fundamentales. El planeta tierra tenía entonces cuatro esferas compuestas por estos elementos puros que la rodeaban en el orden descrito. El movimiento de los cuerpos obedecía a una tendencia natural a ocupar la esfera del elemento que poseían en mayor grado. Así, un leño tiende a caer (la primera esfera) por que su composición mayor es tierra. Cuando lo quemamos, el humo tiende a subir, ya que su mayor componente es el fuego, buscando, pues, esta esfera superior. Las cenizas, por estar compuestas principalmente de tierra, deben caer.

Los planetas estaban contenidos en esferas, que es el sólido perfecto y se mueven en círculos alrededor de la tierra, por ser esta figura geométrica la más perfecta del plano. La última esfera era la del empíreo: la esfera celestial, suprema (ver figura 3.4). La materia que los formaba era éter.

La música estaba íntimamente relacionada con la matemática: la matemática era el lenguaje de la naturaleza, enseñaba (y demostraba) Pitágoras. Los sonidos armónicos seguían proporciones expresables por fracciones de números

36. Hay dos palabras griegas relacionadas con holismo: *holos* (todo, entero, total, organizado) y *holón* (ser todo y parte al mismo tiempo: viene de *holos* y *on*, parte de).

Concepción griega del cosmos

Fig. 3.4

enteros. Las esferas de los planetas, al girar, producían sonidos debido a la fricción con el éter, la materia incorrupta y eterna que llena el universo. Las distancias de los planetas entre sí deben seguir las mismas reglas de la armonía.

El hombre sólo encuentra su sentido real como parte de la sociedad. Aristóteles decía que así como la mano sólo puede asir cuando forma parte del cuerpo, el hombre sólo es un ser superior cuando está integrado a la sociedad. Era tan importante la visión global, que cuando algún fenómeno de la naturaleza no concordaba con ella, se consideraba que este era un hecho sin importancia. Primaba la teoría sobre la realidad. Un caso que ya destacamos en el capítulo 1, cuando hablamos de la experimentación como característica fundamental de la ciencia, era el de la caída de los cuerpos. Según la física aristotélica, un

cuerpo más pesado debía caer más rápido que uno liviano, ya que, al estar compuesto de tierra, la tendencia a su lugar natural debía ser mayor que la de uno más liviano, con menos elemento tierra. Más aún, si el peso de uno de ellos era el doble del otro (doble contenido del elemento tierra) aquel debía caer dos veces más rápido que éste³⁷. No cabe ninguna duda de que jamás se observó tal situación en la caída de los graves. Sin embargo, tal anomalía no fue tenida en cuenta y la ley de Aristóteles primó hasta la aparición de Galileo Galilei. El mundo sublunar era imperfecto. Cuando alcanzara la perfección este comportamiento se corregiría. Esta concepción del movimiento era de tipo teleológico: como ya se indicó, la caída se explicaba por la *naturaleza* de la piedra así como la elevación del humo por la *naturaleza* del humo: ellos debían ocupar su lugar *natural* en el mundo. El movimiento es el paso de la potencia al acto, gracias a la existencia o acción de un "motor".

La concepción del cosmos en la antigua Grecia era global. Cosmología, artes, matemáticas, sociología, política... eran partes que sólo se comprendían como un todo. Esta concepción del mundo recibe el nombre de *holismo* la cual duró hasta la Edad Media (que termina hacia el siglo XV). La fusión entre el dogma cristiano y el pensamiento Griego propendieron por un universo gobernado por las enseñanzas de Cristo, enseñanzas de carácter universal y que explicaban todos los procesos y fenómenos de la naturaleza, tanto física como humana. No olvidemos que el filósofo más importante en este período fue Aristóteles.

Veamos con cierto detalle la transición del pensamiento griego, desde su fusión con el mundo romano, hasta el final de la Edad Media. Para ello utilizaremos apartes del libro de L. Skyttner (2005).

Después de la muerte de Alejandro Magno en 323 a.C. el imperio griego colapsa y se subdivide en varios reinos: el imperio seléucida, el Egipto Ptolemaico, el Reino grecobactriano y el Reino indogriego (Wikipedia). Muchos griegos emigran a otras ciudades griegas de Asia y África, en donde se hablaba el idioma griego, gracias a las conquistas de Alejandro Magno. La dinastía Antigónica establece una especie de unidad del mundo griego, hasta que los romanos, en las guerras macedónicas, lo adhieren a su imperio hacia el año 146 a.C. El Emperador Cesar Augusto, en el año 27 a.C. termina con la anexión de todo tipo de territorio griego, al Imperio Romano. Roma conservó el respeto y la admiración de la cultura del pueblo Griego y la fundió con su propia cultura.

37. En el APÉNDICE literal A.3.2 puede verse la manera como se puede refutar a Aristóteles, con sus propios argumentos, mediante un sencillo análisis matemático.

De allí el término de cultura Greco-Romana. Al caer el Imperio romano, Grecia pasa a formar parte del Imperio Bizantino, el Imperio Romano en Oriente, que perduró desde el siglo V d.C. hasta el año de 1453 cuando este cae; estas dos fechas marcan, según muchos autores, el inicio y fin de la Edad Media.

Recordando a Koyré (numeral 1.3), es necesario comprender que la Edad Media sólo puede entenderse a cabalidad si tenemos en cuenta el paradigma escolástico. El involucraba los problemas divinos y humanos, tratando de armonizar ambos mundos en una sola entidad, en un holismo al estilo griego. El principal asunto en esta visión, era la salvación del alma. Todo en la tierra, social o natural, era un reflejo de la potestad divina y a ella estaba obligada.

El pensamiento científico estaba, pues, sometido a los preceptos místicos, y la mayor parte de los estudios al respecto se centraba en una profunda interpretación de los textos religiosos. El tipo de conocimiento era la introspección (insight) o la revelación. La verdad sólo podía ser establecida por la iglesia. La observación, anotaciones, experimentación y conclusiones objetivas no eran aceptadas como formas correctas de conocimiento. Las fuerzas naturales estaban fuera de toda opción de estudio y cualquier protección de ellas sólo podía venir a través de Dios o de la magia. Todo lo que ocurría tenía un sentido divino. El pobre era gratificado con una vida de felicidad eterna en el cielo; los ricos pecadores, irían al sufrimiento eterno del infierno.

La idea aristotélica de la causa final, la teleología, tomó fuerza como idea central en el pensamiento escolástico. No sólo las cosas se movían por su tendencia natural de estar en el lugar que debían ocupar en el universo (recordar el leño que cae, el humo que sube, las flores que florecen para producir un fruto) sino que debían tener una finalidad.

La razón se consideraba sin importancia e incluso ofensiva ante los misterios de la existencia. Por ello no había distinción entre alquimia y química, astronomía y astrología. “La conexión con la realidad no se precisaba, era imprecisa, implícita e indeterminada”.

No es aventurado suponer que los grandes estudios se hacían alrededor de las bibliotecas a la manera que se hacía en la Biblioteca de Alejandría (siglo III a.C.). A partir del siglo XII aparecen instituciones encargadas de difundir el saber, las cuales, en sus inicios, dependían del clero y el gobierno.

Hasta el siglo XIII la educación en la edad media se hacía a través de las escuelas bien fueran monacales (de las abadías), episcopales (anexas a las catedrales) o

palatinas (de la corte). Ya en algunas de ellas la enseñanza tenía tres grados: 1) leer, escribir, nociones elementales de latín vulgar, comprensión sumaria de la Biblia y de los textos litúrgicos; 2) estudio de las siete artes liberales (trivium: gramática, retórica, dialéctica; quadrivium: aritmética, geometría, astronomía, música); 3) estudio profundo de la sagrada escritura, la facultad de teología a la cual se accedía luego de realizar los estudios en las artes liberales. El conocimiento era integral.

La universidad se inicia partir del siglo XIII como una reforma al sistema religioso de las escuelas monacales. Su estructura era similar a un sindicato “que tutelaba los intereses de determinada categoría de personas”. Todas las demás universidades se inspiraron en la de Bolonia y París. Con el apoyo Papal, se da cierta libertad de enseñanza (Reale y Antiseri, 1999, Tomo I, 416-418). Ellas se auto sostenían mediante contribuciones de sus estudiantes. La investigación se apoyaba en dos pilares: razón y fe. No se establecieron diferencias de clase para poder acceder a ellas.

Al acercarse el período del renacimiento (siglos XV y XVI) las universidades de Europa ya estaban sólidamente establecidas. Empiezan a aparecer conocimientos que no tienen como finalidad el estudio de la Biblia. Ya es posible estudiar sólo las Artes liberales. Se denominan así porque se han liberado del yugo del alma como elemento directriz de los estudios.

En el siglo XVI se afirma un nuevo paradigma: el del Renacimiento.

3.3 El enfoque de sistemas

La edad pre científica toma ahora un nuevo rumbo. La ciencia se apropia de la descripción de los fenómenos. De la introspección se pasa a la observación y estudio del mundo que nos rodea. Una manera metódica de conocer, basada en la observación directa, razonada, reemplaza a las conjeturas, imposiciones, inspiraciones o revelaciones.

A mediados del siglo XVI nace Galileo Galilei. En su famoso libro: *Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica* (1638) da relevancia fundamental al experimento como método para aceptar o refutar la veracidad de un hecho. Son muy conocidas sus críticas a la física Aristotélica. Como se indicó en el capítulo 1, los experimentos de Galileo eran de diversa índole: desde la comprobación física (Aristóteles sostenía que un

cuerpo más pesado que el agua no podía flotar; Galileo hacía flotar agujas de hierro demostrando el error del Estagirita) hasta los sorprendentes experimentos mentales.

A partir de este momento la ciencia experimental inicia un largo y fructífero recorrido. El experimento implica, de alguna manera, un aislamiento del fenómeno para poderlo controlar. No cabe duda que es a través de Galileo que la visión reduccionista se consolida como el método científico por excelencia.

Desde la perspectiva de los cuatro tipos de causas, Aristóteles indicaba que aunque la comprensión del universo sólo era posible bajo la consideración total de ellas, para la filosofía práctica la causa más importante era la causa final. Esta visión se considera antropomórfica, ya que presume que si bien el ser humano puede conocer las causas finales, no tiene sentido exigir que el universo funcione bajo el mismo principio. La reacción fue el mecanicismo, que considera como fundamental las causas eficientes. Ya no interesa el “Por qué” sino el “cómo”. El resto ya es historia conocida. Skyttner comenta:

De aquí en adelante la tradición religiosa Occidental, que sostenía que el ser humano era algo único en este mundo y tal vez en el universo empezó su implacable retiro. La conciencia humana ya no es el reflejo de un origen divino, sino de sí misma. Las autoridades religiosas tradicionales fueron sucesivamente reemplazadas por otras soberanías y los modelos explicativos teológicos fueron cambiados por modelos científicos.

Descartes, Newton imponen su modelo lineal, mecanicista, reduccionista. Como ya lo hemos indicado, fueron grandes los éxitos pero también las limitaciones que el reduccionismo y el mecanicismo lograron y sufrieron en la historia de la ciencia.

El experimento destaca al dato. Estos están allí para que sean desvelados y estudiados y así inferir teorías. De un mismo dato pueden surgir varias “direcciones” dependiendo del conocimiento y formación de quien lo analice. De este modo, se inicia la especialización del conocimiento que refuerza la idea de la influencia de las partes en relación con el todo.

Con las ideas de Galileo las instituciones educativas sufren un cambio fundamental; pasa de las “facultades” a los “departamentos”, seccionando el conocimiento en partes especializadas: física, química, medicina, artes, sociología etc., cada una con sus propias subdivisiones. Se deja que la síntesis del saber la

haga el individuo; él será responsable de la integración de los conocimientos adquiridos. El enfoque holístico es definitivamente abandonado.

Esta nueva manera de percibir el mundo, obligó a los investigadores a considerar, fundamentalmente, aquellos fenómenos que permitieran cierto “aislamiento” del medio en el cual se desarrollaban. Como lo ilustramos con la caída de los graves, estudiada por Galileo, ésta podía ser comprendida a partir del cuerpo en consideración, de la fuerza que la tierra ejercía sobre él y de la altura en que era dejado libre. No era necesario tener en cuenta los demás efectos que el resto del universo pudieran ejercer sobre el móvil en cuestión. Cuando los investigadores se enfrentaban a problemas en los cuales las interacciones con el medio eran más fuertes, sólo les quedaba la alternativa de reducir drásticamente el significado real de su modelo o realizar el estudio ya no en el plano científico (al estilo de Galileo) sino en el filosófico o en el especulativo.

Consideremos, por ejemplo un problema de producción en una línea de ensamble. No están saliendo el número de productos que se planearon. Los expertos en producción observan una baja productividad en los obreros. Deciden utilizar sus conocimientos en tiempos y movimientos para mejorarla. Exigen, además, cierto nivel de producción o de lo contrario el salario del obrero que no lo cumpla será disminuido (sistema de producción a destajo). Lo que se ha hecho es “cerrar” el sistema productivo y limitarlo a métodos de trabajo y producción del obrero. Una forma reduccionista, lineal, de expresar (definir) la situación es la indicada en la figura 3.5.

Pensamiento lineal respecto a la producción

Fig. 3.5

Pero esto puede mirarse desde otra perspectiva. En el caso que nos ocupa, el clima organizacional del área de producción no es el más favorable; los obreros sienten que el ambiente de trabajo es tenso, sin motivación para realizar sus labores. Esto se debe a que la administración está enfrentando dificultades financieras lo cual se refleja en toda la organización. Una manera sistémica de enfrentar este problema de producción es incluir estos factores en su estudio y solución. La figura 3.6 es un ejemplo más acorde con la situación descrita.

Enfoque sistémico (no lineal) de la producción

Fig. 3.6

De acuerdo con esta figura el “ambiente laboral” es influido por la “situación financiera” e influye en la “producción”; ésta a su vez afecta a los “métodos de trabajo” y a la “situación financiera”. Por su parte, los “métodos de trabajo” afectan a la “producción”. No se tiene un punto por dónde empezar, como en la figura 3.5. Recordemos, también, las figuras 2.5 y 2.6.

De ahí la complejidad que este tipo de situaciones trae consigo. Al aislar (cerrar) el sistema, reducimos la situación al ciclo (lazo de retroalimentación): “producción” → “métodos de trabajo” y lo que es peor, lo “linealizamos”: nos olvidamos de que algunos elementos pueden ser afectados por sí mismos. En la visión no lineal también hay un “cierre”. El sistema se ha aislado de gran parte del mundo de los negocios. Pero este “cierre” incluye una parte extremadamente importante: la situación financiera que depende de aspectos externos a la empresa la cual, de acuerdo con la figura 3.6, que es la que más pesa en el estudio de este problema. Esta parte externa es la que se denomina “ambiente (o entorno) del sistema”.

Este enfoque, el *Enfoque de Sistemas*, hace que dos fuerzas presionen para que se presente un cambio en la manera de adquirir el conocimiento. Algunos autores opinan que se están agotando los fenómenos que pueden ser estudiados mediante la técnica del aislamiento. Cada vez son más complejos; existen más interrelaciones con otros fenómenos. Por otra parte, hay necesidad de darle un cierto sentido a todo el saber acumulado por el hombre, a este saber fragmentado. En cierta forma, es la necesidad de volver a ese conocimiento holístico, aristotélico que daba tanto sentido a la vida. Su ausencia es posible que explique, al menos en parte, la tendencia a aferrarnos a ideologías que

tratan de explicarnos a fuerza de doctrina, lo que nuestros conocimientos no pueden darnos a fuerza de razón.

Es cierto que hay muchos fenómenos que son explicables por la mera interrelación de sus partes. Por complejo que parezca un reloj, es posible comprender su funcionamiento total a partir de cada uno de los elementos que lo conforman. Esto explica el porqué un relojero puede repararlos cuando se dañan. Un excelente ejemplo es el ya citado pato de Vaucanson: bate sus alas, toma agua, digiere grano y defeca; todo es explicable a partir de la interrelación de sus partes (figura 3.3).

Pero existen otros fenómenos en los cuáles este tipo de análisis no es conveniente. En estos casos, las partes aisladas no son suficientes para la comprensión del todo; ni siquiera ellas y sus interrelaciones. Existe un lazo tan estrecho entre partes, interrelaciones y todo, que la escisión no es posible. Tal es el caso, por ejemplo, de los problemas estudiados por la Ciencia Social. En éstas, no es conveniente definir las partes (o subsistemas) para luego armar, como en un rompecabezas, el sistema total. La consideración global, holística, debe primar; y es el todo el que debe definir las partes. Este es uno de los temas centrales de las metodologías de sistemas a discutir en capítulos posteriores. De nuevo, utilizando a Aristóteles, esta visión holística rescata las causas finales como fundamentales, pero con una óptica diferente a la original. Norbert Wiener llamó a los sistemas cibernéticos, *sistemas teleológicos*: sistemas orientados a un fin. Estos fines pueden ser predeterminados por humanos o por las leyes de la naturaleza.

Lo dicho explicaría el porqué es posible analizar sin mayor dificultad el ejemplo del péndulo, pero la situación equivalente para el caso de la familia, es claramente más compleja, más difícil de considerar.

En 1937 L. Von Bertalanffy presentó oficialmente la idea de una Teoría General de Sistemas. Su característica general es considerar el estudio de un fenómeno, no mediante la apreciación de hechos aislados, componentes del fenómeno en cuestión, para luego sintetizarlos todos y explicarlo mediante la aglomeración de esas partes, sino mediante la consideración total del fenómeno, tratando de encontrar leyes y relaciones que permitan su comprensión sin recurrir a estudios particulares (Bertalanffy, 1973).

Como destacaba Bertalanffy, el enfoque clásico de la ciencia en áreas tales como la química, la biología, la Ciencia Social y en general, cualquier aspecto

del conocimiento humano, ha consistido en explicar los fenómenos mediante el estudio de elementos particulares (enzimas y compuestos químicos, sensaciones elementales, individuos libres) con la esperanza que, al poner juntos tales elementos, se pueda explicar el fenómeno total (célula, mente, sociedad).

A este respecto Ashby (1972, p.16-17) escribe:

En la actualidad la ciencia se encuentra en una encrucijada. Durante dos siglos ha explorado sistemas que son intrínsecamente simples o susceptibles de ser analizados en componentes simples. El hecho de que un dogma como “varíense los factores de a uno por vez” haya podido aceptarse durante un siglo, demuestra que los científicos estaban absolutamente dedicados a investigar sistemas que permitieran el uso de ese método, pues con frecuencia resulta prácticamente imposible aplicarlo a sistemas complejos. Sólo luego de los experimentos realizados por Ronald Fisher en suelos agrícolas, en la década del 20, se advirtió claramente que hay sistemas complejos en los que no puede aplicarse el método de variar los factores uno por uno, pues estos sistemas son tan dinámicos e interconectados que la alteración de una variable actúa inmediatamente como causa de variación de otras, de muchas otras, quizás.

Queremos destacar que aquí estamos hablando de consideraciones globales de fenómeno en estudio, no de un perfeccionamiento en los procesos lógicos deductivos. Estamos hablando, pues, de un enfoque sistémico.

Por el momento no existe una Teoría General de Sistemas como tal. Podemos decir lo siguiente.

El enfoque de sistemas es una manera de ver el mundo. Implica la visión global, ampliada, interrelacionada de los diferentes aspectos que determinan un fenómeno dado. Cuando se trata de fenómenos complejos se hace necesario recurrir a la interdisciplinariedad.

En una forma amplia, la Teoría General de Sistemas es el estudio interdisciplinario de los sistemas en general, que busca principios que puedan aplicarse a cualquier sistema.

Se soporta en lo que se conoce como *Ciencia de los Sistemas*, que son los conocimientos científicos que en la actualidad utilizan el enfoque de sistemas como su guía. Agrupa las teorías, metodologías, métodos y técnicas que usan el enfoque de sistemas para estudiar situaciones del mundo real consideradas como complejas. Esto incluye, por lo tanto, a la naturaleza, a la sociedad y a

las ciencias mismas. Es común incluir al Análisis de sistemas, a la Teoría de la Información y control, a los Sistemas Dinámicos, a la Dinámica de Sistemas, a la investigación de operaciones, a los modelos sistémicos de la sociología y la psicología, entre otros.

Lo anterior no debe extrañarnos. No debemos olvidar que en la historia de la ciencia esta situación ha antecedido a las grandes síntesis. La teoría del campo –marco unificador de la electricidad, el magnetismo, la gravedad y la luz– fue muy posterior a la generación de teorías específicas en cada una de estas áreas. Incluso antes de ella, se dieron ideas unificadoras previas como fue el caso de la teoría de Maxwell de los campos magnéticos. De todas maneras esta discusión será retomada más adelante.

3.4 El concepto de sistema

En el diccionario nos definen sistema (entre otras acepciones) como: *un conjunto de cosas que, ordenadamente relacionadas entre sí, contribuyen a determinado objeto (función)*. Esta definición, de carácter muy general, no es de mucha utilidad cuando queremos utilizarla en el desarrollo de una teoría de los sistemas, es decir, como lenguaje objeto.

Es necesario aclarar previamente que no es posible dar una definición de sistema que, como tal, satisfaga al mundo científico. Cuando definimos, la definición debe decirnos lo que la cosa es, pero además, lo que no es. Citemos a Poincaré en su libro “Science and Method” (p. 133):

Lo fundamental de cada parte de una definición es distinguir el objeto definido de la clase de otros objetos cercanos. La definición no podrá ser comprendida hasta que no se hayan identificado, no sólo el objeto definido sino los objetos cercanos de los cuales debe ser distinguido, hasta que no se haya logrado identificar la diferencia, y se haya indicado explícitamente las razones por las cuales se ha dicho esto o aquello en la definición dada.

Si consideramos una de las definiciones de sistemas más conocidas: *un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados que cumplen una función*, por exclusión, aquellos conjuntos que no estén interrelacionados y no tengan una función, no serán sistema. Difícilmente se puede encontrar en la naturaleza y

en la sociedad elementos que no cumplan con esta definición, lo cual implica que prácticamente todo sea un sistema.

Con respecto al tipo de sistema que la Teoría General de Sistemas trata de considerar, hagamos la siguiente distinción. Para dos técnicos igualmente expertos en motores de automóviles, la descripción de un motor específico será, sin duda, aceptablemente igual. Bajo esta idea, podemos considerar que el motor es un sistema. Igual ocurre con el *sistema planetario* y el *sistema nervioso humano* por citar dos casos concretos. Es posible diferenciar lo que es un sistema nervioso, de lo que no lo es. Pero para el caso del automóvil, aunque bajo un concepto técnico la diferenciación es clara, para el uso del automóvil la situación es bien distinta. Aquí pueden darse múltiples percepciones: el automóvil como medio de transporte; el automóvil como signo de estatus social; el automóvil como elemento deportivo... Ninguna de estas formas de considerar su uso es mejor que otra. Todas pueden ser igualmente válidas, todas pueden considerarse como “sistemas” y por lo tanto, no habrá un sistema único que pueda describirlas. Adelantándonos un poco a la profundización de estos conceptos, –los cuales serán considerados en el capítulo referente a “metodologías blandas”– diremos que para estos casos, que corresponden a los llamados *Sistemas de la actividad humana* no es posible decir que existe “un sistema”; el sistema aquí es un constructo mental. Estos tipos de sistemas tienen la característica de tener objetivos, propósitos (y no una función determinada). En este texto utilizaremos indistintamente la palabra *sistema* para referirnos a su uso cotidiano o al constructo mental. El contexto permitirá distinguir de cuál uso se trata.

En el capítulo anterior hicimos referencia a los conceptos y elementos no definibles para poder establecer una teoría formal. Pusimos como ejemplos el punto, la línea y el conjunto, pero esto es posible si la teoría en cuestión es abstracta. No tendría sentido recurrir a estas intuiciones para el caso de las ciencias naturales, tal como se indicó en el capítulo 1. Sin embargo, si aceptamos que los sistemas no existen, para el caso de los sistemas de la actividad humana, entonces podríamos decir, como idealización mental, que el concepto de sistema es indefinible.

De todas maneras, es posible proponer una definición operativa cuando no es posible dar una definición nominal³⁸. Aquellas se basan en las operaciones

38. Es decir, exclusivamente referida a lo que un nombre o cosa es. Debe ser clara, exacta y precisa. En muchas ocasiones es necesario remitirse a definiciones en las cuales la semántica juega un papel primordial.

que deben ser realizadas para obtener lo definido. El ejemplo más sencillo es la definición de *longitud*. Definirla en forma nominal no es posible. Sin embargo, todos los científicos están de acuerdo en que la pregunta: “¿cuál es la longitud de un bloque?”, es, para todos los casos prácticos idéntica a: “¿cuál es la diferencia entre los números que figuran en las dos marcas de un metro que coinciden con las esquinas adyacentes del bloque?” (Holton, 1975, p. 260). Algo similar ocurre con el concepto *tiempo*.

Por otra parte, hallar una delimitación que excluya un objeto de otro no es algo que siempre sea sencillo. Holland (2014), señala que si comenzamos a eliminar grano por grano el contenido de un montón de arena, no podemos decidir cuándo éste deja de ser un montón para convertirse en granos dispersos. Es fácil diferenciar los casos extremos: el montón reconocido como tal, y los granos separados, reconocidos como tales. Pero no existe una solución de continuidad que separe un concepto del otro. Esto es lo que ocurre con el concepto de sistema, de vida, de consciencia...

Para el caso de la definición del concepto de sistema, podríamos dar una definición operativa que sea de interés para la T.G.S. Complementando con D. Meadows (2009) podríamos decir que:

- Un sistema es un conjunto de elementos interconectados.
- Este conjunto es de interés para alguien.
- El conjunto se comporta en forma organizada, coherentemente, como un todo integrado no deducible de sus partes.
- La adición o sustracción de elementos modifica radicalmente el conjunto inicial.
- El conjunto hace algo.

El comportamiento como un todo integrado requiere una aclaración. De acuerdo con esta definición, una mesa podría ser un sistema; posee elementos (patas, clavos, tablas...) interrelacionados (mediante leyes físicas y elementos mecánicos y químicos). El que “haga algo” podría interpretarse como la función, es decir, la finalidad para la cual fue hecha la mesa. Tal vez la persona interesada pueda ser un cliente. Es claro que cualquier parte que se retire altera la mesa original; en principio es un todo integrado, pero puede explicarse a partir de las interrelaciones de sus partes. La Teoría General de Sistemas no tiene interés en este tipo de sistemas. Tiene interés en aquellos fenómenos que son *todos* que no

pueden ser divididos en partes independientes, que no tienen una causalidad lineal. Los elementos no deben ser, necesariamente, objetos físicos. Aspectos tan intangibles como la amistad o el deseo de progreso pueden ser elementos legítimos de un sistema.

Para comprender mejor la manera como en un sistema las modificaciones en sus elementos o en su estructura afectan al mismo, utilizaremos el concepto de isómeros químicos.

Los isómeros son compuestos químicos que tienen la misma fórmula química pero cuya estructura es diferente. Son comunes en la química orgánica, aunque también se dan, con menos frecuencia, en la inorgánica.

Un ejemplo típico son el éter dimetílico y el alcohol etílico (etanol), ambos con fórmula C_2H_6O .

La figura 3.7 obtenida de Asimov (1979) los ilustra.

Isómeros: importancia de la estructura
en un sistema

Fig. 3.7

Adelantemos que la estructura de un sistema está definida como el resultado de las interrelaciones de sus elementos. Por lo tanto una ligera variación en la posición de un elemento básico, ya define una estructura diferente. Esto genera diversos tipos de isomería que no es del caso tratar aquí.

Dos estructuras diferentes, con los mismos componentes, producen dos elementos (sistemas) distintos. Más adelante, cuando veamos la propuesta de O. Lange acerca de una teoría formal sobre sistemas, encontraremos una explicación matemática al respecto.

Observemos cómo fue necesario recurrir a un diagrama para establecer el concepto de estructura. En el enfoque de sistemas, interesan más las interre-

laciones que los objetos mismos. En la ciencia clásica, la visión mecanicista se centra en los objetos, entidades que pueden ser medidas. No es así para el caso de los sistemas. Los objetos mismos son interrelaciones, las cuales no pueden ser medidas sino representadas diagramáticamente. De esta manera pueden descubrirse patrones de organización, característicos en los sistemas complejos. Pasamos de la cuantificación a la cualificación, de la consideración de objetos, al análisis de relaciones.

En general los sistemas que nos interesan tienen metas, objetivos, propósitos e ideales. La meta, en una situación particular, es un resultado preferido que puede ser obtenido en un intervalo específico de tiempo. Por su parte, el objetivo es un resultado preferido que no puede ser obtenido en un intervalo específico de tiempo, pero sí en un intervalo mayor. El ejemplo típico es el estudiante que busca ganar cada año (sus metas) para lograr el objetivo final: su grado de bachiller. Sin embargo, esta graduación podría ser una meta de un objetivo mayor: obtener un título profesional. Un propósito se asimilaría a un objetivo pero que no puede lograrse plenamente. El propósito podría ser graduarnos para obtener una vida mejor, pero este concepto sólo es posible conseguirlo parcialmente. Un ideal sería una especie de objetivo que no puede alcanzarse en ningún período de tiempo pero al cual podemos acercarnos continuamente. En nuestro ejemplo, el ideal podría ser la felicidad.

Las definiciones anteriores se refieren a un tipo de sistema que Ackoff llama sistemas *intencionados*³⁹. Estos sistemas poseen la capacidad de elegir entre diferentes metas y tienen la particularidad de poder decidir. Los sistemas a los que haremos referencia en la presentación de este texto son sistemas que poseen por lo menos un elemento con capacidad de voluntad: hablaremos, pues –salvo indicación específica o evidente por el contexto de lo discutido– de sistemas intencionados (ver APÉNDICE A.5.1).

El término *función* se refiere a un resultado predeterminado, a un diseño: un reloj tiene como función indicar la hora, para eso fue fabricado. No puede, en ningún momento, decidir no marcar el tiempo; no podemos decir, entonces, que tenga como propósito dar la hora. Repetimos: los sistemas que son de nuestro interés son los intencionados. La mesa o el reloj no son, por esta razón, sistemas que llamen la atención de la T.G.S. En principio tampoco un robot. Aclaremos lo dicho. Para la T.G.S. el robot podría ser de interés, pero

39. Ackoff distingue entre *intencional* (purposive) e *intencionado* (purposeful). Los sistemas intencionales son generados por la naturaleza o por los seres humanos; los intencionados tienen voluntad, se adaptan, tienen conciencia.

no como elemento en sí, sino bajo un *enfoque sistémico*. Es la manera de ver el mundo, no el mundo en sí.

En 1954 Kenneth Boulding (Economista), Anatol Rapoport (Biomatemático), Ralph Gerald (Fisiólogo) y Ludwig Von Bertalanffy (Biólogo) crean la “Sociedad para la investigación de Sistemas Generales” (Society for General Systems Research, SGSR). El programa de esta sociedad tenía como objetivos (Bertalanffy, 1973, p. 13):

... Desarrollar los sistemas teóricos aplicables en más de un departamento tradicional del conocimiento: sus funciones principales son: (1) investigar los isomorfismos de los conceptos, leyes y modelos en diversos campos y ayudar para obtener transferencias útiles de un campo a otro; (2) crear el ambiente favorable para el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos donde falten; (3) minimizar la duplicación del esfuerzo teórico en campos diferentes; (4) promover la unidad de la ciencia mejorando las comunicaciones entre científicos.

3.5 Isomorfismo

Los isomorfismos son equivalencias estructurales entre dos fenómenos. Debemos distinguirlos de las analogías que son similitudes de comportamiento o de forma. Si una niña juega con su muñeca y la regaña, le cambia su pañal y le da biberón, ella acepta una similitud de forma entre la muñeca y un bebé de verdad; es una analogía. Lo correcto es que la deje, después de cierto tiempo, en algún sitio. Pero si esta niña cree que se trata de un bebé real, entonces el caso es patológico y requiere tratamiento psicológico: ve una similitud estructural entre la muñeca y el bebé, donde sólo existe una analogía.

La relación que se observa entre la red de carreteras de una región y el mapa que las representa es un buen ejemplo de isomorfismo: son estructuralmente equivalentes. Las distancias a escala del mapa son las distancias reales así como su posición en el espacio. El término inicialmente se aplicó a las estructuras matemáticas.

Cuando intentamos copiar la forma en que, en medicina, se estudia un paciente, con la manera de enfrentar una situación compleja en la administración utilizamos analogías. Los médicos auscultan, preguntan, ordenan exámenes,

hacen juntas en casos difíciles, diagnostican y formulan. Algo similar se puede hacer en la administración de una empresa. Pero son evidentes las limitaciones que tiene tal comparación. Es útil, pero no es, en ningún momento, un isomorfismo. La similitud no es de fondo (estructural); es sólo de forma, de proceso. Sin embargo, cuando Stafford Beer desarrolla su "Modelo de Sistema viable" a partir de un enfoque cibernético utilizando el organismo humano como metáfora, se acerca a un verdadero isomorfismo entre una empresa y el cuerpo humano.

Las leyes, en la ciencia son isomorfismos: la ley de la caída de los graves es válida para todo tipo de cuerpo⁴⁰.

3.6 Tipos de sistemas

Para una comprensión de los sistemas (reales o constructos mentales) y sus propiedades, es necesario diferenciar entre diferentes tipos de sistemas, de acuerdo con su relación con el entorno que los rodea⁴¹. Consideremos las siguientes definiciones:

- *Sistema aislado*. Es aquel que no intercambia ni materia, ni energía, ni información con su ambiente. Tal es el caso de un gas confinado en un recipiente de paredes rígidas y completamente aislado térmicamente. Es el utilizado en los constructos mentales de la ciencia clásica.
- *Sistema cerrado*⁴². Puede intercambiar energía e información pero no materia con su ambiente. Por ejemplo, un recipiente que contiene agua a temperatura por encima de la temperatura ambiente y no está aislado térmicamente. En cierta forma podemos considerar como sistema cerrado el planeta tierra: existe un intercambio de calor entre ella y el resto del universo y, exceptuando los meteoritos que caen en ella, no hay intercambio de materia⁴³.

40. Para conocer un poco más sobre el tema, ver el APÉNDICE numeral A.3.3.

41. En la ciencia clásica el universo está compuesto por materia y energía. Es conocida la estrecha relación que existe entre estos dos conceptos. La visión moderna agrega el concepto de información como parte integral de la naturaleza. Para este trabajo, consideraremos la materia, la energía y la información como los elementos a ser tenidos en cuenta para las definiciones de sistema aislado, cerrado y abierto.

42. O parcialmente aislado.

43. Las dos únicas formas de energía que un sistema puede dar o recibir sin que

- *Sistema abierto*. Existe intercambio de materia. Puede también intercambiar energía o información con el ambiente. Bertalanffy (1974, p. 93) habla de *interacción de fuerzas*. Son los más comunes. La célula, los órganos, los organismos, por sólo citar algunos ejemplos del campo biológico, son ejemplos de sistemas abiertos.

Podemos indicar que fue Galileo quien le dio trascendencia al concepto de sistema aislado, como lo vimos al inicio de este capítulo. Es el fundamento del reduccionismo. La primera ley del movimiento de Newton dice: *Todo cuerpo material persiste en su estado de reposo o movimiento uniforme (no acelerado) en línea recta, sólo si no actúa sobre él una fuerza resultante (no equilibrada)*. En este enunciado nada actúa sobre el cuerpo; el sistema está completamente aislado. En los sistemas aislados la suma de todos los tipos de energía permanece constante, aunque las energías del sistema puedan tomar distintas formas en el transcurso del tiempo. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en las colisiones de cuerpos perfectamente elásticos⁴⁴.

De acuerdo con estas definiciones, lo que hizo Galileo en el estudio del péndulo, por ejemplo, fue definirlo como un sistema aislado. Queremos resaltar que de cierta forma, los sistemas aislados no son comunes en la naturaleza, por no decir que no existen. Son concepciones (constructos) mentales que facilitan el estudio de fenómenos complejos. Los sistemas cerrados y los abiertos existen en forma abundante. A la Teoría General de Sistemas le interesa los sistemas abiertos; los sistemas aislados y los cerrados han sido ampliamente estudiados y utilizados por la ciencia tradicional.

Fue Bertalanffy quien llamó la atención de la importancia de los sistemas abiertos para la Teoría General de Sistemas. Aquí lo que es considerado como sistema intercambia con el medio que lo rodea materia, energía e información. Por ejemplo, en biología los organismos vivos pueden considerarse esencialmente como sistemas abiertos: se mantienen en una interacción constante con su ambiente, intercambiando energía, materia e información, construyendo y reconstruyendo sus partes, sin tender a un equilibrio químico o termodinámico, sino a un estado estable⁴⁵.

exista transferencia de materia son el calor y el trabajo. También la información se puede transmitir sin necesidad de transferencia de materia.

44. Para una explicación de este tipo de choque véase el APÉNDICE numeral A.4.1.

45. Equilibrio químico: no hay reacciones químicas. Equilibrio termodinámico: no existe intercambio de calor. En el capítulo 3 se retoman estos conceptos.

¿Es la familia un sistema cerrado o abierto? Si la reducimos al padre, la madre y los hijos, viviendo en su lugar de habitación, *conceptualmente* sería “cerrado” (no olvidemos que necesitamos aire y alimentos para sobrevivir); pero si incluimos en el concepto de familia a los tíos y amigos, a la compra de alimentos, y a las relaciones con otras familias, se debería considerar como un sistema abierto.

Los sistemas aislados (cerrados) tienden a alcanzar *estados de equilibrio*. Los sistemas abiertos tienden a *estados estables*. Ambos tienen la característica de que, vistos globalmente, sus componentes permanecen constantes. Sin embargo, son dos estados fundamentalmente diferentes. En los sistemas aislados, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, el estado de equilibrio –que es de máxima entropía y mínima energía libre– *debe alcanzarse*. En los sistemas abiertos el estado estable *puede* alcanzarse bajo ciertas condiciones; en dicho estado el sistema permanece constante en sus componentes, pero existe un flujo continuo de materia entre el sistema y su ambiente. La entropía tiende a minimizarse; el sistema puede realizar trabajo.

Los sistemas cerrados en equilibrio no necesitan energía para su conservación, ni tampoco pueden ceder energía a su entorno. Un recipiente cerrado, que contenga agua, tiene energía potencial, pero no puede transformarla. En cambio, si se le abre un orificio, la energía potencial puede transformarse en energía cinética y producir trabajo. Para poder producir trabajo, necesariamente el sistema no puede estar en equilibrio sino tratar de alcanzarlo: ésta es la única manera de ganar energía. Si nuestro tanque no tiene una entrada de agua, una vez terminada la que contenía, habrá alcanzado un estado de equilibrio y el sistema será ahora cerrado. Para poder continuar como sistema abierto, el ambiente debe suministrarle la materia necesaria, logrando mantener su estado estable, alejado del estado de equilibrio: un nivel o un rango de niveles dado. Esta idea puede hacerse extensiva a los sistemas de la actividad humana.

Consideremos por ejemplo, una fábrica, compuesta de maquinaria y seres humanos: toma del medio materia, energía, información, dinero, y los transforma en productos y servicios. Esta empresa, es pues, un sistema abierto. Un bosque también lo es.

Las consideraciones anteriores nos permiten definir ciertas características fundamentales en los sistemas abiertos que no se encuentran en los sistemas aislados o cerrados. Estas serán estudiadas cuando hablemos de las *leyes de los sistemas*.

3.7 Patrón, estructura y proceso

Estos tres conceptos facilitan enormemente la comprensión y aplicación del concepto de sistema a situaciones reales.

El *patrón* es la configuración de las relaciones entre los componentes de un sistema. Son las “leyes” generales que lo definen y regulan. Es lo que identifica al sistema. Un patrón general a cualquier sistema es la red, bien sea considerada desde su perspectiva matemática o bien desde una concepción intuitiva. Los isomorfismos son similitudes estructurales, como se indicó anteriormente. Un isomorfismo no es, pues, otra cosa que el patrón que rige tales similitudes.

Por su parte, la *estructura* es la manera como el patrón se manifiesta, se objetiva, se refleja en sus componentes. Es el resultado de las interrelaciones de sus componentes. En los isomorfismos expresados matemáticamente, la estructura la da la ecuación respectiva.

Cuando en un sistema sus elementos (partes) se modifican o cambian continuamente, cuando en el sistema hay un flujo de energía, de materia, de información, entonces a este flujo, a este cambio lo denominamos *proceso*: se ocupa de la continua corporización del patrón. Estructuras y procesos están íntimamente relacionados. Así, un país posee una estructura industrial, fruto de las interrelaciones de las diferentes empresas productoras con la economía nacional; esta “red” genera un proceso productivo. El patrón nos enseña a distinguir entre lo que es industria y lo que no lo es: por ejemplo, la industria minera lo es. La estructura particulariza un tipo de industria: la minera es diferente a la industria automotriz. Y el proceso se referirá a la forma en que la industria minera lleva a cabo sus funciones, algunas comunes, pero otras diferentes al resto de otras industrias.

No comprender esta interrelación es la causa de muchos intentos fallidos, tan común en las organizaciones, de cambiar los procesos con el fin de resolver ciertos problemas, sin considerar cambios en las estructuras que permitan que los procesos se lleven a cabo. Las estructuras determinan los procesos y no al contrario; por ello los cambios en los procesos son generalmente inocuos pues son las estructuras las que se deben modificar: al alterarlas se modifican los procesos. Debemos aclarar, sin embargo, que cuando los sistemas son inestables o vulnerables, los procesos pueden generar cambios en las estructuras. Esto es lo que ocurre en las revoluciones sociales, pero estos son casos particulares y extremos. En general, los sistemas se estudian bajo condiciones de estabilidad.

Capra ilustra la diferencia entre patrón y estructura tomando como ejemplo una bicicleta (1999, p. 172). Para que algo sea una bicicleta debe tener dos ruedas, un marco que las una, pedales para transmitir potencia muscular (a través de una cadena o en forma directa) y una dirección. Esto permite diferenciar una bicicleta por ejemplo de un triciclo o de una carreta (y obviamente, de un avión). Sin embargo existen bicicletas todoterreno, extremas, de carrera: todas ellas “bicicletas” pero con estructuras diferentes según su función. Con este ejemplo no es posible ilustrar el concepto de proceso.

Otro ejemplo: se dice que existen diferentes estilos (teorías) de administración: los de tipo Fayol y Taylor, los basados en la burocracia, los sistemas de la reingeniería, los autocráticos etc. Todos ellos son maneras de administrar.

Tienen pues algo en común: el concepto de administración que es el patrón: todos planifican, comunican, organizan y controlan con el fin de lograr ciertos objetivos. Sin embargo, este patrón se materializa en diferentes formas de administración, a las que hicimos referencia en el párrafo anterior: cada una de ellas obedece a una estructura administrativa diferente. Por su parte en la ejecución de tales formas administrativas es necesario un flujo de información, materia y energía que le sea particular a cada una de ellas. Son los diferentes procesos administrativos.

Podríamos proponer que una definición nominal se refiere al patrón o a la estructura mientras que una definición operativa estaría relacionada con los procesos.

Para el caso de la familia, podríamos pensar que es necesario que existan al menos dos individuos, con relaciones permanentes de consanguinidad o afinidad legal. Este sería un patrón con el cual podríamos indicar si una relación entre varios individuos puede definirse como familia o no. Así, un grupo de personas conocidas que estén conversando en un parque, no podría denominarse como una familia, de acuerdo al patrón indicado. Sin embargo, y como se dijo en el capítulo 1, existen diversos tipos de familia tales como la extensa (padres, hijos, abuelos, primos, tíos...), monoparental (los hijos viven sólo con uno de sus padres), homoparental (los hijos viven con una pareja homosexual), poligámica (los hijos viven con un padre y varias madres)... Estas son deferentes manifestaciones del patrón familia: demarcan estructuras diferentes. En cada uno de estos tipos de familia se pueden dar diversas formas de comportamiento que pueden ser socialmente aceptadas por ciertas culturas, pero por otras no. Así se dan familias en las cuales la madre no puede caminar delante o al lado

del padre, familias en las cuales las órdenes sólo las da el padre, familias en las cuales el padre es el único que puede trabajar y no la madre, etc. Estos serían los procesos que se dan al interior de las estructuras respectivas para que el “sistema familia” pueda llevar a cabo sus funciones y objetivos.

3.8 Ciencia, tecnología, filosofía de sistemas

Bertalanffy considera que debemos distinguir tres aspectos diferentes cuando nos referimos a los sistemas, aspectos que si bien son inseparables en su contenido, son distintos en su intención: el primero es la ciencia de los sistemas, el segundo la tecnología de sistemas y el tercero la filosofía de los sistemas.

Respecto a la *ciencia de los sistemas* podemos decir que busca una teoría científica de los sistemas en las distintas ciencias (física, biología, ciencias sociales) así como el establecimiento de una teoría general en cuanto un conjunto de principios aplicables a todos ellos. La idea es la búsqueda de isomorfismos en las ciencias. De alguna manera, la Teoría General de Sistemas busca los isomorfismos más generales a partir de isomorfismos particulares. Tal es el caso, por ejemplo, del crecimiento: existe crecimiento en las colonias de individuos, en las plantas y animales, en el dinero puesto a interés. Debe existir, por lo tanto, un isomorfismo general que abarque los isomorfismos (leyes) particulares del crecimiento poblacional, de plantas y animales, del dinero en los bancos⁴⁶. De hecho existe una ley general del crecimiento que estudiaremos en el numeral 5.3.1. Como corolario de lo anterior, la ciencia de los sistemas pretende la creación de un vocabulario común como primer paso hacia la unidad de la ciencia. Actualmente puede decirse que gracias a los desarrollos de las teorías modernas sobre la complejidad, se ha logrado un avance importante en este aspecto.

La *tecnología de los sistemas* es la consideración de los problemas que surgen en la tecnología y la sociedad moderna debido a la aplicación de nuevos desarrollos tecnológicos. Existen grandes avances tanto a nivel de hardware (computadores de alto rendimiento, autómatas de gran complejidad, para citar sólo dos) como del software. Disciplinas como la Investigación de Operaciones, la Teoría de la

46. En el APÉNDICE literal A.3.3 se ha indicado un ejemplo de isomorfismo en la ingeniería. En el capítulo 12, numeral 12.1, se indicarán interesantes isomorfismos relacionados con temas administrativos.

Información y la cibernética han abierto nuevas perspectivas para el estudio de los sistemas, particularmente para aquellos en los cuales la complejidad ha sido su característica más notable. Actualmente se ha enriquecido notablemente este aspecto con el desarrollo de nuevas teorías matemáticas como son la teoría de los fractales, la teoría del caos y el pensamiento en redes (Network Thinking). Los desarrollos tecnológicos han permitido avances importantes por ejemplo en ecología, sociología y la teoría de la administración.

Por otra parte, la búsqueda de métodos globales ha planteado problemas filosóficos de gran envergadura, que es el tema de la *filosofía de sistemas*. Para Bertalanffy son tres los aspectos que deben aquí ser considerados:

- *La ontología de sistemas*. Se trata de descubrir lo que se entiende por sistema y cómo éste concepto se aplica en los diferentes campos del conocimiento humano. La definición de sistema pertenece a este aspecto. El problema de la Teoría General de Sistemas, en su perspectiva ontológica, tiene que ver con lo que puede decirse respecto a los sistemas materiales, a los sistemas de información, a los sistemas conceptuales y a cualquier otro tipo de sistema vistos desde su razón de ser, desde sus fundamentos. La *cosa-en-sí*.
- *La epistemología de sistemas*. Por lo dicho anteriormente, estamos ante una nueva forma de conocer el mundo, una manera diferente a la de las epistemologías del positivismo lógico. A esta nueva manera se le ha llamado *enfoque de sistemas*: es la visión de las cosas consideradas como un todo. La realidad es vista como un todo jerarquizado (jerarquía de todos organizados, interrelacionados). No existen hechos totalmente aislados. No podemos obtener una concepción de los cosas mirándola desde sus componentes y con ellos conceptualizar el todo. La epistemología de sistemas analiza la forma de aprender a ver el mundo bajo esta nueva perspectiva.
- *La axiología de sistemas*. Se ocupa del problema de los valores, de la relación entre el hombre y el mundo. Nuestra situación en el mundo es distinta si nos consideramos parte de él (fruto de la concepción jerárquica del mismo) o si nos consideramos separados de él. El mundo de los símbolos, de los valores, de las entidades sociales y culturales son tan reales como las realidades naturales. Como dice S. J. Gould (*Op. Cit.*) debemos integrar las ciencias y las humanidades, la tecnología y la historia, las ciencias naturales y las ciencias humanas, hacer que nuestras dos partes cerebrales trabajen como un todo. Esto le daría una nueva perspectiva a nuestra po-

sición como seres humanos y por lógica, a nuestra escala de valores frente al planeta y a la sociedad⁴⁷.

3.9 Resumen

Aquí hemos retomado las características de aislamiento y reduccionismo típicas del procedimiento clásico de la ciencia. Una visión reduccionista y su correlato mecanicista ha logrado modelos que explican una gran variedad de fenómenos de la naturaleza y algunos de los sistemas sociales. No obstante, sus limitaciones son claras: ha dejado a un lado la explicación de la vida soslayando así una gran cantidad de situaciones complejas: por ejemplo, las guerras (en nuestro planeta), las hambrunas, el cambio climático...

Una visión retrospectiva del pensamiento griego nos permite vislumbrar lo que es la visión moderna del enfoque sistémico y la teoría que lo desarrolla. Se enfatiza el significado de la no linealidad, de la no explicación del todo por sus partes, del no aislamiento de los fenómenos a estudiar, para poder comprender su complejidad integrada al entorno que los rodea.

Nos encontramos con la dificultad de definir lo que es “un sistema”, situación similar a la que se presenta cuando se quiere definir “ciencia”. La opción de suponer que, en general, los sistemas no existen sino que son constructos mentales que nos permiten comprender y modelar aquello que se nos presenta como complejo, permite, si no resolver, al menos considerar el problema ontológico que el concepto conlleva, es decir, el de su existencia real. Hemos discutido cómo los constructos mentales son comunes en las ciencias físicas y, por ende, en las demás ciencias. El péndulo de Galileo, las “leyes de los gases perfectos” son constructos mentales, idealizaciones de situaciones que permiten explicar fenómenos del mundo real.

Estudiar las interrelaciones es más difícil que determinar los elementos que puedan definir a un sistema. Identificar, en una familia dada, al padre, la madre y los hijos, por ejemplo, es un ejercicio trivial. Pero ¿cuáles son sus interrelaciones? ¿Qué tipo de materia, energía, información existe en ellos y entre ellos

47. Debemos aclarar. Sí existen dicotomías entre las llamadas “ciencias duras”, y las “ciencias blandas”. Lo que llama la atención Stephen Jay Gould es sobre la falsa dicotomía entre ciencia y humanismo. Por este último entenderemos la filosofía, el arte en todas sus expresiones, la religión, las creencias metafísicas.

que permiten identificar ciertos patrones, ciertas estructuras, ciertos procesos; que permiten observar ciertos comportamientos ?

También nos ocupamos del concepto de isomorfismo. Este permite comprender la idea de subsumir en un mismo concepto fenómenos aparentemente diferentes. Ello permite también precisar la idea de una visión global de los fenómenos a través de un vocabulario común.

En este capítulo se plantean igualmente conceptos como sistema cerrado -relativo a la ciencia tradicional-, y sistema abierto -relativo a la ciencia de sistemas-, diferencia entre equilibrio y estabilidad. La distinción entre patrón, estructura y proceso ayuda a identificar con mayor precisión aquello que explica y conforma el constructo mental sistema, que permite estudiar los fenómenos complejos.

En la parte final, se introdujo la diferenciación conceptual (pero no desarticulada) de los aspectos científicos, técnicos y filosóficos del enfoque de sistemas para lograr afianzar lo que debemos entender por “pensamiento sistémico”.

CAPÍTULO 4

LEYES DE LOS SISTEMAS

4.0 El concepto de ley

Reiteradamente hemos hecho referencia a las leyes como parte fundamental de una teoría. Esto implica que la T.G.S. deba tener leyes que sean afines a su campo de acción.

En efecto, es posible enunciar algunas leyes relativas a los sistemas en general. Dichas leyes juegan un papel importante en el estudio y comprensión de los “sistemas”. Pero antes discutamos el concepto de ley.

Dijimos anteriormente que las leyes eran un importante caso de isomorfismo. Toda teoría que pretenda ser científica debe, por lo tanto, establecer leyes. En un sentido estricto, la palabra “ley” se reserva para aquellas proposiciones que puedan ser medidas y acertadas, expresadas por lo común en lenguaje matemático. La ley que describe la caída de los graves ($h=1/2 gt^2$), el balance de una ecuación química ($2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$), la ley de estímulo-respuesta de Weber-Fechner en psicología ($dP=k dS/S$ para el caso de las diferencias de peso, p , entre dos objetos y la capacidad de sentirlos, S), el equilibrio entre oferta y demanda en economía, son ejemplos de este tipo de ley⁴⁸. Cuando estas relaciones son más bien de carácter cualitativo (como por ejemplo cuando se afirma que las moléculas de un gas se mueven proporcionalmente en todas direcciones), o cuando se utilizan modelos hipotéticos que ayudan a la comprensión de un fenómeno (como por ejemplo cuando se asegura que la presión de un gas sobre el recipiente que lo contiene se debe a la fuerza de choque de sus moléculas contra las paredes del recipiente), se habla entonces de principios, postulados, hipótesis, teorías o reglas. No haremos tal distinción y utilizaremos, salvo algunas excepciones que serán destacadas, el término ley como equivalente a los términos enunciados.

48. El siguiente sistema de ecuaciones es una forma simplificada del equilibrio entre la oferta y la demanda: $S_t = a + bP_{t-1}$, $b > 0$, $D_t = c - dP_t$, $cd > 0$, S_t es la oferta, D_t la demanda, P_t el precio del producto, a y b son parámetros que describen el comportamiento del productor, y c y d los del consumidor. Cada vez que se propone un precio, $D_t = S_t$.

¿Qué relación existe entre ley y teoría? Las teorías contienen un universo de explicación más amplio. Ellas se ocupan del *porqué* funcionan ciertas leyes. Las leyes describen comportamientos, pero no nos explican el “porqué” de tal o cual fenómeno. Una teoría puede existir antes de poderse verificar su validez. Las leyes, en cambio, exigen comprobación inmediata. Pero en ocasiones puede ocurrir que las leyes antecedan a la teoría que las pueda contener. De hecho, motivan a su desarrollo.

Siguiendo a Holton (1975, p. 233-234), distinguiremos tres tipos de leyes: *empíricas, de definición y deducidas o derivadas*.

Una ley es *empírica* cuando surge de la observación continuada de determinado tipo de fenómeno. Puede ser descriptiva o numérica, tema que abordaremos más adelante. Este tipo de ley, desde un punto de vista lógico, no puede aceptarse como una verdad universal, ni siquiera general. Un buen ejemplo es la ley de Pareto⁴⁹, en economía. En química podemos citar la ley de Proust: cuando dos o más sustancias químicas se combinan para formar un determinado compuesto, los pesos de una de ellas que se combinan con un peso fijo de la otra, guardan entre sí una relación dada por números sencillos. En economía, la ley de la oferta y la demanda. En biología, la ley de *todo o nada* está referida al hecho de que no existe una relación entre la intensidad de la acción de una neurona y el potencial de una señal de entrada: cada descarga de una neurona en particular genera un impulso de la misma intensidad, sin depender de la intensidad del potencial de entrada: se descarga o no (Morris & Maisto, 2001, p. 50). Ellas son fruto de la inducción.

Las leyes de *definición* se denominan así porque usualmente llevan consigo la definición de conceptos fundamentales. En otras palabras, son definiciones que se convierten en ley. Surgen de la observación de un principio regulador aplicable a una variedad de fenómenos aparentemente distintos, mediante un proceso de inducción. Tal es el caso de la ley de Galileo del movimiento de proyectiles o la relación $F = ma$ de la física newtoniana. Estas leyes exigen la formulación de nuevos conceptos: en el caso de Galileo el principio de superposición (independencia de los componentes vertical y horizontal de la velocidad) y la definición de aceleración. En el caso de Newton, la definición de masa y en cierta forma, de fuerza. En psicología podemos citar el concepto de

49. Se conoce como la ley del 80-20. Por ejemplo, el 80% de los habitantes de un país viven en el 20% de las ciudades. El 80% del costo de un inventario está en el 20% de los artículos de dicho inventario. Esta ley encuentra aplicación en economía, sociología, demografía, etc. Más adelante la estudiaremos como la ley 1/f.

actividad mental: Los elementos simples e irreducibles sobre los que descansa toda la actividad mental son: sensación, sentimiento e imagen. Son leyes de mayor alcance y confiabilidad que las empíricas, a pesar de que ambas son de tipo inductivo, debido a que poseen un mayor soporte teórico.

Las leyes deducidas siguen un esquema lógico-deductivo. Son obtenidas a partir de ciertos postulados o axiomas. Por ejemplo, la ley del movimiento pendular puede deducirse a partir de las tres leyes del movimiento de Newton. Es posible deducir la ley de la caída libre de un cuerpo a partir de las definiciones de velocidad y aceleración promedio y movimiento rectilíneo uniformemente acelerado⁵⁰. En psicología podemos citar la ley de la respuesta múltiple: se favorece el proceso de aprendizaje si el individuo dispone de un repertorio de respuestas posibles ante una situación concreta. Estas leyes son más “seguras” debido a su carácter lógico-deductivo. Sin embargo, lejos están de ser universales o eternas en sentido absoluto. No podemos garantizar que la ley de la gravitación universal ($F=Gm_1 \times m_2/R_2$) sea válida para las relaciones intergalácticas, y necesita ciertos ajustes si queremos utilizarlas en el mundo subatómico. De todas maneras, este es el tipo de ley al cual aspira toda teoría cuando quiere ser lo más depurada posible. Una teoría es más poderosa y consistente en la medida en que sus leyes formen parte de una teoría general, y no dependa de observaciones particulares en campos aislados de la misma teoría. Así, la ley de la gravitación universal no sólo explica las leyes empíricas –conocidas ya por los antiguos como era el caso del movimiento de la luna– sino que extiende su poder de aplicación a muchos planetas permitiendo encontrar peculiaridades no observadas antes. En economía podemos citar la fijación de los precios de los bienes, deducible de la ley de la oferta y la demanda.

Podemos decir que las leyes empíricas, válidas en un campo limitado, no tienen suficiente información para prevenir al que las utiliza irrestrictamente, cuando las aplica a un campo nuevo. En el caso de las leyes deducidas, esta limitación subsiste aunque mucho menos. A pesar de que han sido obtenidas deductivamente, ellas están ligadas a las hipótesis que les dieron origen, y de acuerdo con lo discutido en el capítulo anterior, la validez de estos postulados están siendo sometidos continuamente a contrastación⁵¹.

50. En el APÉNDICE, literal A.4.2 se explica dicha deducción.

51. En el capítulo siguiente se discutirán otros aspectos de este importante tema.

4.1 Leyes sistémicas

En lo que sigue indicaremos leyes sistémicas de diversas categorías, de acuerdo con lo expuesto en este texto: algunas son empíricas, otras de definición y otras deducidas. Tienen su origen en diversas perspectivas del estudio de los sistemas: unas surgen de la biología, otras de la cibernética y el resto de otras ramas del saber.

El lector no debe suponer que todas las leyes se aplican invariablemente a cualquier sistema. Existen sistemas que obedecen a algunas de ellas, mientras que otras no les son aplicables.

Veamos algunas.

4.1.1. Equifinalidad

Como se indicó anteriormente, en un sistema cerrado el estado final, es decir, el estado de equilibrio puede ser alcanzado sólo a partir de un conjunto dado de condiciones iniciales y a través de una trayectoria única. En un sistema abierto, por el contrario, puede llegarse al mismo estado estable final a través de un número diferente de rutas y aun partiendo de diferentes condiciones iniciales. Tal es el caso del crecimiento de un niño con problemas nutricionales al cual se le administran dosis de alimentos con el fin de restaurar las condiciones normales de desarrollo. En condiciones favorables, es decir, aquellas que permitan una corrección del proceso, este niño alcanzará un estado estable igual al que hubiera logrado si desde el principio su nutrición hubiera sido la conveniente. El estado equifinal será en este caso el estado estable. También puede ocurrir que de un mismo estado, o grupo de estados, se alcancen diferentes estados finales, generándose una divergencia que produce *multifinalidad*. Estos estados equifinales o multifinales puede imaginarse propuesto por un ser superior y hablaríamos de *teleología*. Jaques Monod (1971, p. 24-) propone el concepto de *teleonomía*: en los sistemas abiertos, de procesos estables, estos tienden a estados equifinales a partir de su historia y su capacidad evolutiva.

En el caso de los sistemas de la actividad humana, los objetivos propuestos (estados equifinales) se pueden alcanzar a partir de diferentes condiciones iniciales generadas por cambios que afectan al sistema. Es lo que observamos en los estudios universitarios: al final se alcanza la graduación, a pesar de las

huelgas, la pérdida de materias o los problemas económicos que nos hayan obligado a suspender el estudio en algún momento.

Como ya lo hemos indicado los sistemas cerrados tienden a estados de equilibrio. Los sistemas abiertos, a estados estables. En ambos casos hablaríamos de equifinalidad. En un estado de equilibrio el sistema no puede realizar trabajo. En un estado estable, por el contrario, el sistema está alejado del equilibrio y puede ejercer influencia sobre el medio que lo rodea. Un organismo vivo se mantiene en estabilidad y es por lo tanto un sistema abierto. Al morir, se convierte en un sistema cerrado, alcanzando un estado de equilibrio: cesa todo tipo de transferencia de calor entre el cuerpo y su ambiente.

4.1.2 Centralización (integración)

Como la característica básica de un sistema es la interrelación de sus partes, para que un sistema se comporte como tal a medida que crece, debe mantener sus elementos relacionados entre sí. Por esta razón, se hace necesaria la existencia de un elemento “coordinador” o “dominante” que se encargue de tal función: el cerebro humano hace un papel centralizador con respecto al resto del cuerpo; una orquesta sinfónica invariablemente necesita un director.

4.1.3 Descentralización (mecanización)

Paradójicamente, si la estabilidad de un sistema descansa en su capacidad de integración, su complejidad descansa en la división de funciones. Mientras más elementos diferenciados existan en un sistema, mayor será el potencial de complejidad de su comportamiento⁵². En cierta forma, una ameba es un sistema perfecto ya que al ser unicelular, el todo hace todo: traslación, alimentación, reproducción... Al dividirla lo único que se logra son dos amebas idénticas. Desde el punto de la supervivencia es lo máximo que puede desearse, pero el pago por esta propiedad es su simplicidad: cuatro o cinco funciones elementales es todo lo que puede realizar. Por el contrario, el ser humano al poseer órganos diferenciados, puede ejecutar una enorme cantidad de funciones ampliando enormemente la complejidad de su comportamiento. La orquesta sinfónica

52. Diferenciados en sus funciones, más que en su composición.

permite mayor variedad de interpretaciones entre más maestros y más instrumentos diferentes posea. Los sistemas complejos tienden a una diferenciación y mecanización progresiva.

4.1.4 Mecanización-centralización

Las dos leyes anteriores se funden en una sola ley: ellas no son contradictorias sino complementarias. Ambas son necesarias y ambas se dan simultáneamente en muchos sistemas abiertos. Desde un punto de vista biológico, el estado primitivo es aquel en el cual el comportamiento del sistema resulta de la interacción de partes equipotenciales. Progresivamente ocurren subordinaciones a las partes dominantes. El cerebro domina a los órganos especializados: cuando se inicia la concepción de un ser humano, las células son idénticas; pasado un tiempo, empiezan a diferenciarse formando las diferentes partes de las que se compone (ojos, cabello, uñas, corazón, brazos...); un grupo de ellas se reserva para la formación del cerebro el cual toma el comando del resto del organismo. En sociología, distinguimos una sociedad de otra por sus líderes (elementos centralizadores) así como por los conocimientos y habilidades de sus ciudadanos.

4.1.5 Entropía mínima

En los sistemas aislados y en los cerrados, como se ha insistido, la entropía sólo puede aumentar, o sea, el sistema cada vez está en menor capacidad de realizar trabajo. Por el contrario, en los sistemas abiertos, bajo ciertas características, estos se acercan a un estado independiente del tiempo, un estado estable. Dicho estado se mantiene a distancia del verdadero equilibrio, siendo capaz de realizar trabajo. Este estado estable, que no es otra cosa que un estado equifinal, se alcanza independientemente de las condiciones iniciales y está determinado únicamente por los parámetros del sistema: la entropía tiende a ser mínima. Los seres vivos luchan continuamente contra la entropía utilizando para ello la interacción con el ambiente que los rodea. Evidentemente, al final la entropía triunfa, pero durante un intervalo de tiempo esta aparente violación de esta ley es la que permite que los sistemas abiertos puedan permanecer en estados estables, lejos del estado de equilibrio⁵³.

53. Otra forma de entender la entropía es considerar que, en los sistemas cerrados,

Aquí podemos hacer una importante distinción entre la ciencia analítica, tradicional, y la de los sistemas: la primera se ocupa de sistemas cerrados (si se extiende a sistemas abiertos, estos permiten delimitar el sistema, incluyendo el ambiente y redefiniéndose así como un sistema cerrado), que tienden a estados de equilibrio y a máxima entropía. Por el contrario la segunda se ocupa de sistemas abiertos, que tienden a la estabilidad, minimizando la entropía: el ambiente y el sistema, interactúan.

4.1.6 Variedad obligada

Ashby (1972) define la variedad de un conjunto como el número de elementos diferenciables que éste posee (o como el $\log_2$ de este número y la medida es en bits)⁵⁴. Así, el conjunto $\{a, b, c, a, c, b, a\}$ de siete elementos tiene una variedad de tres (o de 1.585 bits: $\log_2 3$). Esta definición implica que la variedad es relativa al observador: depende de su capacidad o necesidad de diferenciación. Si, por ejemplo, disponemos del siguiente conjunto de elementos: $\tilde{O}, I, O$ que tiene una variedad de tres (1.6 bits) y una persona no puede distinguir entre $\tilde{O}$ y O , entonces para esta persona la variedad de este conjunto es dos (1 bit). Por otra parte, si el conjunto es $\{a, b, c, A\}$ la variedad dependerá si hacemos distinción entre a y A , o no.

La variedad es una propiedad del conjunto, no de un estado particular del sistema. El sistema $\{\tilde{O}, O, I\}$ sólo puede estar en uno de sus tres estados por lo que su variedad es nula en cada caso (no es posible diferenciar un estado de otro ya que, en el momento, es único). Sólo considerando los diferentes estados a través del tiempo, o imaginándonos que hay réplicas simultáneas del sistema cuando los elementos se presentan uno a la vez, es como podemos calcular la variedad del conjunto.

Los sistemas abiertos están sometidos a los cambios del ambiente. Éste tiene una variedad y el sistema, otra. Generalmente la variedad de este es mayor que la del sistema. Si no fuera así, el sistema podría evaluarlo (controlarlo) en su totalidad. Por ejemplo, si el clima se definiera mediante los cuatro elementos: lluvia, viento, temperatura y rayos, y el ambiente sólo tuviera lluvia y viento

las temperaturas de los cuerpos tienden a igualarse. Si entran en contacto con un ambiente, tienden a igualarse con la temperatura de dicho ambiente.

54. El $\log_2 a = \log_{10} a / \log_{10} 2 = \log_{10} a / 0.30103 = 3.322 \log_{10} a$

mientras que el sistema tuviera la posibilidad de protegerse de los cuatro elementos, es obvio que el sistema podría protegerse completamente del ambiente: la variedad de este es 2, mientras que la del sistema es 4 para los elementos considerados. Por el contrario, si el ambiente tiene todos los elementos descritos (variedad 4) y el sistema sólo dispone de protección para la temperatura y el viento (variedad 2), estamos a merced de él en lo que corresponde al clima (no hay protección para la lluvia y los rayos que se pueden presentar en cualquier momento). Otra forma de ver la variedad en este ejemplo, es que pudiéramos describir la lluvia mediante cuatro variables, el viento mediante tres, la temperatura mediante tres y los rayos mediante dos variables. En este caso, si el sistema sólo puede distinguir dos variables del primero, una del segundo, las tres del tercero y una del cuarto, la variedad del ambiente (12) es superior a la del sistema (7).

El ambiente puede perjudicar al sistema generando perturbaciones, por lo que es necesario que éste se adapte a, o se defienda de dichos cambios. Se hace necesario un elemento protector. El diagrama de efectos inmediatos, figura 4.1, nos muestra la relación entre las perturbaciones D , el elemento protector F y un sistema S .

Relación entre las perturbaciones, el elemento protector y el sistema

Fig. 4.1

La fuente de perturbación tiene una variedad $v(D)$ de estados posibles. El sistema es un elemento que tiene una variedad $v(S)$ de *estados esenciales*, $S_1, S_2, \dots, S_n$. De estos n estados, un subconjunto, $\eta = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ (no necesariamente los k primeros estados) se consideran letales o de efectos perjudiciales; los restantes no. F es un elemento que se encarga de permitir que D ejerza influencia sobre S sólo en el rango de los estados sensibles, es decir, es un elemento protector: reduce la variedad de D para equipararla con la de S .

Por ejemplo, consideremos un cuarto que se mantiene a temperatura constante gracias a un termostato. Aquí S_i son las diferentes temperaturas que puede tomar el cuarto: $\eta = [19^\circ, 21^\circ]$ es el rango de temperaturas permitido (deseado), en gra-

dos centígrados; D son todos los fenómenos que pueden cambiar la temperatura del cuarto: vientos fríos, vientos cálidos, lluvias, sol... F , el termostato⁵⁵, trata de minimizar los efectos de D en S , manteniendo la temperatura en el rango deseado. Un termostato perfecto es aquel que bloquea todas las variaciones de D y sólo entrega al sistema una temperatura entre 19 y 21 grados centígrados. En el caso de una familia, si el padre es quien trabaja él intentará evitar que las dificultades de su oficio y la falta de dinero afecten sensiblemente a su familia: en ese caso es un elemento regulador.

De acuerdo con lo anterior, queda claro que la variedad de η debe ser menor que la variedad de S . Un regulador es un elemento que disminuye la variedad de D con el fin de lograr una variedad en S igual a la de η . El regulador es un bloqueador de transmisión de variedad. Extendiendo el ejemplo de la relación de un padre con su familia podríamos decir que un buen administrador, desde el punto de vista de la regulación, es aquel que logra sortear todos los problemas económicos que rodean a su organización y logra que dentro de ella esta situación no sea sensible, pagando a tiempo sus deudas, a sus empleados y en general, haciendo que la entidad marche como si nada pasara en el ambiente externo. El termostato perfecto no permitiría ninguna variación en un rango de la temperatura del cuarto, de tal manera que nadie podría darse cuenta de los cambios de temperatura del exterior. En conclusión *F es un buen regulador si bloquea el flujo de variedad que va desde las perturbaciones a las variables favorables del sistema.*

Las relaciones entre D , F y S pueden representarse mediante una tabla T en la que D representa las filas de la tabla, F las columnas y los resultados de las respuestas de F a la acción de D , el contenido de la tabla, son las variables esenciales del sistema. Esto se ilustra en la figura 4.2. En esta tabla no existen elementos repetidos en cada columna.

El teorema de la variedad obligada, visto desde esta perspectiva, nos dice que:

$$\text{Variedad en } T \geq \text{Variedad en } D / \text{variedad en } F$$

La variedad en los resultados (variedad en T) = 6, variedad en D = 6, y variedad en F = 3.

55. Un termostato permite la regulación automática de la temperatura. Para ampliar el tema ver APÉNDICE literal A.4.3.

	F			
D		α	β	γ
	1	a	c	f
	2	c	b	d
	3	b	a	c
	4	e	d	b
	5	d	f	e
	6	f	e	a

Relaciones entre D, F y S

Figura 4.2

De lo anterior queda claro que sólo la variedad de un regulador puede lograr una disminución en la variedad de D. Como dice Ashby (1972, p. 282):

La variedad puede destruirse sólo por medio de la variedad.

Esta es otra de las maneras de presentar la ley de la variedad obligada.

Debemos aclarar que el esquema de la figura 4.1 es una manera simplificada de un sistema de regulación. En una forma más avanzada, deben existir lazos de retroalimentación (feedback), o de postalimentación (feedforward) que afecten al elemento regulador para que se adapte a los cambios del ambiente o del sistema, según el caso.

4.1.7 Emergencia sistémica

Los sistemas son algo más que la adición de sus elementos. La emergencia sistémica se define como *aquellas propiedades que poseen los sistemas y que ninguna de sus partes posee*. Aristóteles había dicho que *el todo es más que la suma de sus partes*. Este aforismo no fue comprendido sino mucho después, cuando se hizo palpable la propiedad de la emergencia de los sistemas.

Un ejemplo clásico es el caso del compuesto “azúcar” (sacarosa: $C_{12}H_{22}O_{11}$). Ni el carbono, ni el hidrógeno, ni el oxígeno que son sus componentes tienen la propiedad de tener un sabor dulce. Pero el azúcar sí lo tiene.

Ashby señala cómo durante años los físico-químicos habían tratado de descubrir el porqué las moléculas del caucho son contráctiles. Se sabe ahora que estas moléculas no son inherentemente elásticas. Si se estira una, no sucede nada. "Estirar un caucho" no significa estirar una molécula. Como hay más de una, cada una de ellas ejerce una acción sobre las otras, y el resultado es que la longitud total del conjunto es menor que la máxima posible.

En la física clásica, muchas propiedades emergentes pueden explicarse a partir del comportamiento de sus partes. Pero en el caso de los sistemas abiertos, esto no es así. En este caso, esta ley riñe de alguna manera con los principios de la deducción. En un silogismo, la conclusión no puede tener ningún elemento que no esté contenido en las premisas tal y como se indicó en el capítulo 1. El comportamiento emergente de un sistema, en principio, no está contenido en forma explícita en ninguna de sus componentes. E. Laszlo dice que existen ciertas propiedades de algunos elementos que sólo se manifiestan cuando entran en acción con otros elementos del sistema. Están latentes y son inobservables cuando estos elementos están aislados.

Considerando la emergencia como "una novedad" del sistema, Laszlo acota (1972, p. 176):

Hay, inicialmente, una novedad introducida por una mediación externa intencional, como lo es el ensamblaje de un reloj hecho por un relojero. Aquí la información necesaria para producir la novedad es suministrada del exterior donde ella preexiste en su totalidad (es decir en la mente del relojero). En segundo lugar, hay la novedad basada en la información que ya está presente en el sistema y se manifiesta en la forma de un conjunto de códigos (estructuras que los poseen), como es el caso de los cromosomas, que llevan la información necesaria para el desarrollo del organismo maduro. Pero sólo la tercera forma de emergencia constituye la "verdadera emergencia": en ella la información es generada durante el proceso del cual la estructura reorganizada, se forma. La evolución, en todos los niveles de los sistemas de la naturaleza, es de esta forma: no se trata de *teleología*, el logro de un propósito existente, sino de *teleonomía*, la emergencia del propósito en sí o, más exactamente, de la organización dinámica que lo manifiesta.

S. J. Gould (2010. p. 267) comenta al respecto que las propiedades emergentes no aparecen en ningún nivel inferior de la cadena de inferencias, al no ser

aditivas; son *principios* de nivel superior por lo que no pueden ser analizadas desde un punto de vista reduccionista.

Aclaremos un poco más lo dicho. Consideremos la expresión general " $a \rightarrow b$ " en donde el símbolo " $\rightarrow$ " indica una relación cualquiera entre los elementos a y b . Si identificamos a a con el número 7 y a b con el número 5, y además la relación es "se suman aritméticamente", podemos decir que el resultado de "7 y 5 se suman aritméticamente", es doce, ya que las partes, 7 y 5, son definidas no sólo en sí (se trata de números) sino que su interrelación (la suma en este caso) forma parte de sus propiedades intrínsecas. 12 es el resultado esperado, deducible de la combinación de tales partes.

Consideremos ahora que a es Marta y b es Pedro y la relación " $\rightarrow$ " significa "se agradan"; la expresión anterior se leería "Marta y Pedro se agradan". ¿Podemos ahora predecir el resultado de este sistema? Evidentemente no. Las partes no tienen predeterminada, como elemento constitutivo, un resultado único para la relación "se agradan". Muchas cosas pueden ocurrir: una amistad, un noviazgo, una sociedad, una enemistad... y por lo tanto no hay un determinismo que pueda ser analizado desde un punto de vista reduccionista.

De acuerdo con esta ley las propiedades de un sistema se destruyen cuando este es seccionado, reducido a partes aisladas, bien sea conceptual o físicamente.

4.1.8 Jerarquización

Todo sistema está formado por subsistemas, y a su vez forma parte de sistemas que lo contienen. Por ejemplo, la Universidad está compuesta por subsistemas: administración, docencia, investigación, extensión... Pero ella es a su vez es subsistema de un sistema mayor: las universidades de la región. Estas universidades son a su vez parte del sistema educativo nacional, el cual está inmerso en el Ministerio de Educación e interrelacionado con otras instituciones, etc.⁵⁶ La figura 4.3 ilustra esta idea.

56. Obviamente esta es una de las formas de ver la universidad como sistema. Podríamos considerar como subsistemas, en otra apreciación, los diferentes programas: Ingenierías, medicina, bellas artes..., la administración en general, los laboratorios...

Jerarquización de sistemas

Fig. 4.3

Lo anterior nos lleva a considerar dos extremos: uno inferior compuesto por una partícula, irreducible a subsistemas y otro superior, todo el Universo. Esto crea un problema filosófico de fondo: en el extremo inferior tendríamos un sistema que si bien forma parte de sistemas superiores, es decir, está contenido en otros sistemas, no contiene a ningún subsistema). Violaría por lo tanto la ley de la jerarquización.

Algo similar ocurre en el extremo superior: el Universo sería el gran sistema que los contendría a todos, pero que no sería contenido por ningún otro sistema. Este tema lo retomaremos en el capítulo 14.

La jerarquización nos lleva a considerar un nuevo elemento afín al sistema: el *ambiente del sistema*. Grosso modo el ambiente rodea al sistema y lo determina. La separación entre ambiente y sistema se logra indicando aquellos elementos que poseen recursos de los cuales el sistema depende para su subsistencia pero no los posee. Más adelante, en el numeral 9.4.3 hablaremos un poco más sobre este tema.

4.1.9 Acoplamiento

La definición de sistema nos indica que existe una interrelación entre sus partes; de acuerdo con este principio, todo sistema está estructurado por el acoplamiento entre ellas. Pueden ser de carácter matemático, como en el caso de la cibernética por ejemplo, o relaciones de tipo conceptual, como en los sistemas sociales. Las figuras 4.1 y 4.3 muestran el acoplamiento entre diversos subsistemas.

4.1.10 Totalidad

Tal y como hemos venido subrayando, un sistema debe concebirse como un todo.

Podemos decir que hay dos posiciones respecto a la consideración de la totalidad. Algunos consideran que por el momento los todos y las partes podrán explicarse entre sí, como es el caso, por ejemplo, de la cibernética. Otros investigadores sostienen que no es posible deducir las leyes del “todo” de las leyes de las partes. Polanyi y Nagel son de esta línea. De cierta forma estamos tocando asuntos relativos a la formalización de la teoría de sistemas, que será nuestra discusión en el próximo capítulo⁵⁷.

En psicología, a partir de la teoría de la percepción según el punto de vista del movimiento gestalt⁵⁸, se indica que percibimos todos integrados, no partes aisladas. En la figura 4.4, por ejemplo, el cerebro completa lo que falta con tal de darle un significado al dibujo.

De Gaetano Kanizsa⁵⁹

Fig. 4.4

El “triángulo” blanco parece superponerse a otro triángulo y a tres círculos. El triángulo no sólo “aparece sin estar” sino que además adquiere un color blanco más intenso que el espacio del mismo color que le rodea. El cerebro “integra” estos elementos para darles un sentido más coherente. De hecho el

57. El lector podrá estarse fatigando con tanto: “tema que se ampliará más adelante”, “tema a discutir en próximo capítulo”. Pero qué podemos hacer; la teoría de sistemas, ¡es sistémica! Este es un buen indicativo de la dificultad de llevar a la práctica la noción de sistema y sus implicaciones.

58. Palabra en alemán que significa “forma orgánica”.

59. (1913-1993), obtenida de: <http://www.ilusionario.es/INVESTIG/kanizsa.htm>

cerebro continuamente nos engaña. Este tipo de observaciones es la que le da firmeza a la posición filosófica de que la “realidad” sólo puede ser conocida por la razón, no por los sentidos.

Consideremos estas leyes mediante los dos ejemplos que hemos utilizado a lo largo de este escrito: el péndulo y una familia.

El péndulo, si parte de alturas diferentes regresará al mismo punto de donde partió: las condiciones iniciales determinan el estado final, alcanzando un estado de equilibrio⁶⁰. Respecto a la familia, para las situaciones normales, la tendencia a un estado de convivencia dentro de ciertas reglas puede considerarse como un estado equifinal, pero no de equilibrio sino de estabilidad. Ante diferentes circunstancias (estados iniciales) se logra mantener la convivencia.

La centralización y mecanización progresiva se ve claramente en el caso de la familia: las responsabilidades se reparten, y existe un elemento centralizador. Esto no ocurre en el péndulo. No hay desarrollo de nuevos elementos que “complejicen” el comportamiento.

La propiedad emergente en el péndulo es la regularidad de sus oscilaciones. En el caso de la familia, su constitución como entidad social, como elemento protector de sus integrantes, es una propiedad que sólo la familia como un todo puede exhibir.

La jerarquización, en el caso del péndulo, no existe. No hay subsistemas sino partes. En el caso de la familia la jerarquización es clara: existen subsistemas tales como hijos, padres y a su vez forman parte de subsistemas que los contienen: el barrio, la ciudad... resultando sistemas cada vez más complejos.

La ley de acoplamiento implica interrelaciones claramente determinadas. En el péndulo son de carácter físico, son causalidades lineales. En el caso de la familia son más de carácter social y moral. Son retroalimentadas.

El péndulo puede explicarse por partes y la ley general que lo rige se obtiene de consideraciones parciales de las leyes de Newton, como se puede observar cuando se sigue de cerca la forma en que es deducida la ecuación diferencial que lo define (recordar la ecuación 1.1). Su comportamiento es explicable a partir de los comportamientos de sus partes. En el caso de la familia, esto no es así: no

⁶⁰. Equilibrio de un cuerpo significa que durante el paso del tiempo no cambia su comportamiento sin necesidad de recurrir a fuentes externas de energía. Esto es igualmente válido para un cuerpo que permanece en reposo, como para el caso del péndulo galileano que se mueve eternamente.

podemos deducir, de la interrelación de sus elementos, su característica como entidad social. Sí es resultado de tales interrelaciones, pero no es deducible.

4.2 Complejidad y reductibilidad sistémica

Entre 1950 y 1970 la Teoría General de Sistemas tuvo un importante desarrollo. Muchas disciplinas recibieron su influencia (ciencias de la administración, sistemas tecno-sociales, psicología, antropología, economía, sociología. Curiosamente no la biología, por el dominio del enfoque mecanicista de la biología molecular) y lograron cierto éxito con este enfoque. Sin embargo, tal vez porque no se obtuvieron leyes generales que cubrieran amplios campos del saber, o porque las propuestas ambiciosas con que se inició su programa ante la comunidad científica no fueron alcanzadas, o por la exigencia del uso de la matemática como lenguaje de esta teoría, matemática que hasta el momento sólo podía lidiar con la linealidad, la T.G.S. sufrió una serie de críticas severas. Por suerte, los trabajos sobre autopoiesis y Teoría de la Complejidad, que son “Teorías de Sistemas” revivieron la propuesta original de Bertalanffy y sus colaboradores. Una nueva tendencia para abarcar estos conocimientos fue proponer un nuevo nombre: “Ciencia de los Sistemas”. Por esta razón, es necesario traer a colación, en este texto, el tema de la complejidad en forma más elaborada.

Sin embargo, luego de los avances logrados después de los años 70 la situación no ha cambiado mucho. Los problemas sobre contaminación, guerras, alimento en el mundo, siguen iguales. ¿Por qué entonces, si disponemos de una teoría de sistemas que intenta analizar esto y otros grandes problemas, la situación sigue igual?

Capra (1999, p. 31) comenta que la dificultad es el cambio de valores de la sociedad que gobierna y regula a las naciones (los líderes políticos y económicos). Combinar el pensamiento y los valores asertivos, con los integrativos. Los primeros han dominado al mundo hasta ahora. Son fruto de una visión mecanicista, reduccionista. Los segundos son los sugeridos por el enfoque sistémico. El siguiente cuadro indica estas dos posiciones frente al mundo en la cual se ha cambiado asertivo por auto-asertivo (2014, Capra & Luisi, p. 13).

Pensamiento		Valores	
<i>Autoasertivo</i>	<i>Integrativo</i>	<i>Autoasertivo</i>	<i>Integrativo</i>
racional	intuitivo	expansión	conservación
analítico	sintético	competición	cooperación
reduccionista	holístico	cantidad	calidad
lineal	no-lineal	dominación	asociación

Existen muchas definiciones de *sistema complejo*. Unas destacan la dificultad de comprender el sistema; otras, la dependencia del sistema del número de elementos que lo componen y de las múltiples interrelaciones entre ellos; otras más parten de la dificultad de describirlo en palabras; algunas enfatizan el hecho de que un sistema puede ser percibido de diferentes formas y que, por lo tanto, no existe una única manera de considerarlo; algunas otras indican la dificultad (imposibilidad) de explicar la emergencia de los sistemas a partir de sus subsistemas.

Basar la definición de complejidad en su descripción trae como consecuencia la paradoja de saber si un objeto (un sistema) es su descripción o, por el contrario, la descripción es el objeto. Al no poder ser claros en este aspecto, la definición es difícil de aplicar.

De lo anterior parece quedar claro que la complejidad no es necesariamente una propiedad inherente a los sistemas, sino más bien una propiedad relativa al observador; es subjetiva.

Una *definición práctica* (operacional) nos dice que un sistema es complejo cuando no podemos, mediante un proceso mental (sin ayuda de otras herramientas distintas a nuestro raciocinio y memoria) predecir, a corto o a mediano plazo, su comportamiento. El sistema sería más complejo si aún con este tipo de ayudas no podamos indicar su evolución en el tiempo.

Un excelente ejemplo es el problema de la contratación de docentes en una universidad (Ritchmond y Peterson, 2000, p. 1-14). Durante los últimos diez años, los profesores titulares vienen jubilándose a una tasa de 10 profesores por año. La universidad contrata inmediatamente 10 profesores novatos que inician su carrera docente y tardan 5 años en llegar a la categoría de titular. La planta de profesores titulares es de 50 docentes. No existen efectos aleatorios ni en la jubilación ni en la contratación. Repentinamente, en el año 11 se jubilan 15 profesores. Inmediatamente la universidad contrata 15 docentes nuevos para

reemplazarlos y esta situación continúa igual, sin cambio, durante los años siguientes. Se trata de predecir, sin ningún cálculo y utilizando sólo nuestra intuición y sentido común, cómo variará el número de profesores de planta a partir del año 11. La gráfica 4.5 sugiere algunas opciones.

Comportamiento a futuro del total de titulares

Fig. 4.5

Se invita al lector a que luego de haber propuesto algún comportamiento (posiblemente diferente a los sugeridos en la figura 4.5), haga los cálculos respectivos y observe el resultado.

En la solución de este problema se ha encontrado que en general, e independientemente de la formación académica de las personas, difícilmente se encuentra la correcta. Aquí no hay efectos impredecibles ni un gran número de elementos; ni siquiera las relaciones son complicadas. Podemos diferenciar, a partir de este ejemplo, lo que se conoce con el nombre de *complejidad estática* y la *complejidad dinámica*.

La *complejidad estática* tiene que ver con el manejo de un gran número de datos, generalmente fruto de muchas interrelaciones y muchos elementos en el sistema. Es el primer tipo de complejidad con el que nos enfrentamos en muchas ocasiones cuando se estudia un sistema. Vemos un gran número de estados (situaciones de un sistema que podemos diferenciar, como por ejemplo, en el estudio de una universidad, el número de profesores, de alumnos, de personal administrativo, los promedios de graduación, el presupuesto etc.), y muchas variables (para cada profesor su hoja de vida, para cada estudiante datos como edad, sexo, lugar de residencia, materias que ya cursó y su respectiva nota, etc.).

Estos sistemas pueden estudiarse o bien mediante el uso de las computadoras que permiten manipular todas estas variables de manera muy efectiva (por ejemplo el control de pago de impuestos de un país) o “reduciendo la variable” mediante procedimientos estadísticos. Un adjetivo mejor para estos casos sería *complicado* en vez de complejo.

La *complejidad dinámica*, por su parte, tiene que ver con la dificultad de predecir el comportamiento del sistema, es decir, implica una evolución en el tiempo. No depende tanto del número de elementos y de sus interrelaciones, como de la manera como éstas interrelaciones se manifiestan.

La complejidad estática y la dinámica se hacen presentes de diversas maneras. Por ejemplo, como veremos posteriormente, los sistemas caóticos son altamente complejos a pesar de que las ecuaciones que los rigen son totalmente deterministas; por su parte los sistemas adaptativos tienen múltiples relaciones y cambian según los afecte el ambiente.

Con respecto al tamaño de un sistema debemos aclarar que debe referirse al número de distinciones que es posible hacer, a su variedad (Ashby, 1972, p. 90): sea el número de estados disponibles o bien –si los estados están definidos vectorialmente– el número de componentes en el vector (es decir el número de sus variables o de sus grados de libertad). Ambas medidas están relacionadas, puesto que si todo lo demás es igual, la adición de variables también produce posibles estados adicionales. Además, desde nuestro punto de vista funcional también podemos agrandar un sistema sin cambiar el número de variables, midiendo ésta en forma más precisa y distinguiendo así un mayor número de estados. Así, en el numeral 4.1.8 hicimos referencia a la universidad. Las distinciones que hicimos fueron: administración, docencia, investigación, extensión. A su vez, la administración puede considerarse formada por divisiones de personal, contabilidad, archivo, tesorería. La docencia, por materias que se dictan por facultad y nivel de capacitación del docente. La investigación, por los diferentes proyectos de las diferentes facultades. La extensión, por los proyectos de apoyo a la comunidad que prestan los diferentes departamentos. Igualmente, esta complejidad se puede aumentar bien considerando nuevos elementos (por ejemplo incluir en investigación una división entre teórica y aplicada) o bien subdividiendo aún más algunas de las divisiones ya establecidas: incluir por ejemplo, no sólo las materias por facultad, sino los diferentes cursos ya que pueden existir diferentes clases para una misma materia.

Cuando el número de elementos y sus interrelaciones son la causa de la complejidad, ésta puede medirse en cierta forma. Consideremos dos casos extremos: un sistema compuesto por n elementos que no interactúan (lo cual realmente no es un sistema pero nos sirve de referencia) y uno en el cual todos sus n elementos interactúan. En el primer caso, el número de conexiones es 0; si consideramos ahora el caso más sencillo de sistema (una cadena abierta) el número de conexiones es de $n-1$. Cuando todos los elementos están interconectados el total de conexiones es $n^2 - n$. En general, los sistemas no tienen todos sus elementos interconectados (mas sí conectados), lo cual hace que su complejidad disminuya. Esta noción es muy importante cuando se desea estudiar un sistema mediante diagramas causales del tipo ilustrado en figuras tales como la 1.5, 3.6 y 4.3: si todos los elementos se interrelacionan es muy difícil modelar (y comprender) un sistema; de hecho debemos sospechar que algo no está bien en las interrelaciones establecidas pues no habría *reductibilidad* (Ashby, 1972, p. 357): se dice que un sistema es *reductible* si sus partes son funcionalmente independientes. La reductibilidad es, en cierta forma, una propiedad de los sistemas complejos tema que está íntimamente relacionado con la casi-descomponibilidad de los sistemas, a tratar más adelante.

Para formarnos una idea de cuanta reducibilidad se presenta en el mundo en que vivimos, comparemos su comportamiento ordinario con el que tendría si súbitamente perdiese su reducibilidad, esto es, si cada variable tuviese un efecto inmediato o retardado en las demás. El mero hecho de dar vuelta la página de este libro, en lugar de ser eso y nada más que eso, podría originar un cambio en las luces, un movimiento en la mesa, un cambio en la velocidad del reloj y así similarmente en toda la extensión del cuarto. Si el mundo fuera realmente irreducible, la regulación sería tan difícil que resultaría imposible, y no podría existir ninguna forma organizada de vida.

Como hemos indicado reiteradamente en este texto, los sistemas son conceptos, maneras de concebir fenómenos. No son, pues, cosa distinta a modelos de una realidad que buscan simplificarla para poder entenderla y, en lo posible, manipularla.

Una manera de reducir la complejidad es considerar el patrón que define al sistema. Encontrar las reglas generales, los comportamientos comunes a sistemas similares nos permiten percibir el fenómeno en lo fundamental. Una célula es, sin duda, un sistema complejo. ¿Qué es lo que caracteriza a cualquier

célula? Esto nos permite definir una célula en sus partes fundamentales. La figura 3.2 es un buen ejemplo.

Otra ilustración sobre este tema es la forma como Linneo redujo la complejidad del mundo vegetal a través de su extraordinaria clasificación. La unidad de clasificación es la especie y éstas se identifican mediante una fórmula binomial: género (características familiares) y especie (características particulares). La clasificación de los seres humanos es *homo* (género) *sapiens* (especie)⁶¹.

También la complejidad se puede reducir mediante la definición de su estructura: elementos fundamentales con sus interrelaciones. En medicina se describe al sistema nervioso mediante dibujos en los cuales se destacan los órganos básicos y la forma en que se conectan entre sí mediante una red de conexiones nerviosas. Debido a su enorme complejidad se subdivide en sistema nervioso central, periférico, somático y autónomo. La figura 4.6 nos muestra el sistema nervioso central (fuente: Wikipedia).

Sistema nervioso central

Fig. 4.6

61. El tema se amplía un poco en el APÉNDICE, literal A.4.4.

La descripción del proceso de un sistema es otra forma de simplificar su complejidad.

Un ejemplo de una parte del proceso de la elaboración de un asado (cortar la carne → ponerla en las brazas → esperar a que se ase un lado → voltear la carne para azar el otro lado → retirar de las brazas) se indica en la figura 4.7⁶².

Diagrama de proceso parcial. Asado de una carne

Fig. 4.7

Lo que hemos hecho en la reducción de la complejidad no es otra cosa que buscar una representación, abstracta o gráfica del sistema. De hecho, se trata de una reducción de la variedad. Todas las leyes de la ciencia –y estas leyes no son otra cosa que modelos de estructuras– son reducciones de variedad (Ashby las denomina constricciones). El modelo no es otra cosa que un regulador. Es importante resaltar la relación que existe entre *complejidad y no linealidad*.

Muchos autores relacionan estos dos conceptos hasta el punto de definir la complejidad a partir de lazos de retroalimentación: para que un sistema sea complejo es necesario que en su estructura existan lazos de retroalimentación positiva y negativa, así como demoras, es decir, un lapso entre la causa y el efecto. En el caso de la jubilación y contratación de profesores –el ejemplo dado al inicio de este numeral– la dificultad en la predicción se presenta por el tiempo que transcurre entre la contratación y la jubilación, es decir, la demora entre ambos eventos y no tanto por la retroalimentación (que es simplemente contratar un número de profesores igual al de los jubilados). En la Teoría de la Complejidad hay otras consideraciones al respecto, como veremos en su momento.

62. Para una mejor comprensión véase el APÉNDICE, literal A.4.5.

4.3 Sistema retroalimentado

Sigamos a Bertalanffy (1973, p. 157-158). Quienes tengan conocimiento de algunos conceptos de cibernética, podrían estar tentados a pensar que el concepto de sistema abierto y retroalimentación (feedback) son equivalentes. Nada más equivocado.

El *lazo de retroalimentación* constituye el elemento fundamental de la cibernética. Permite comprender estructuras y procesos de gran cantidad de sistemas. Un diagrama que describe un sistema con retroalimentación es el de la figura 4.8.

Esquema de un lazo de retroalimentación

Fig 4.8

Este esquema es aplicable a innumerables situaciones. Consideremos el caso de un termostato que deseamos mantenga la temperatura de un cuarto en 20 grados centígrados, cuando la temperatura exterior es de 15 grados (estímulo). Inicialmente el *receptor* censa la temperatura del cuarto (receptor), que es de 15 grados y la compara con la deseada (*Aparato de control*): 20 grados. Entonces se envía un mensaje al *efector* para que genere calor, elevando la temperatura del cuarto. Este nuevo valor es retroalimentado al *receptor* el cual detecta la nueva temperatura, por ejemplo 17 grados. De nuevo este dato es comparado con los 20 grados deseados. El proceso se repite hasta que el cuarto alcance este valor, y el *efector* deja de producir calor. Como el cuarto comienza a enfriarse por efecto de la temperatura externa, el proceso se reinicia. Situaciones similares se observan en el piloto automático de un aeroplano, en las reacciones de los músculos ante cierto tipo de estímulos y en muchas decisiones administrativas, entre muchos otros ejemplos.

Un caso interesante es la homeostasis que es el mantenimiento del balance en el organismo y una de cuyas manifestaciones es el mantenimiento de la temperatura corporal en los animales de sangre caliente. Si la sangre se enfría (estímulo) esto actúa sobre ciertos centros cerebrales (mensaje-aparato de con-

trol) que a su vez activan mecanismos de generación de calor (efector) el cual es enviado al centro receptor con el fin de mantener la temperatura constante.

Como podemos deducir de la definición dada, el lazo de retroalimentación es resultado de un arreglo estructural del tipo de la figura 4.8. La transmisión de información es parte fundamental de esta estructura. Por su parte, el sistema abierto no maneja el concepto de información y corresponde a procesos cinéticos y termodinámicos: su fundamento es la interacción dinámica de sus componentes. Un esquema general de un sistema abierto lo indica la figura 4.9 (Bertalanffy, 1973, p. 135).

Esquema de un sistema abierto sencillo

Fig. 4.9

Aquí ambiente y sistema interactúan simultáneamente. Como puede observarse, el diagrama fundamental es de tipo causal. Este modelo indica que la transferencia de un material a_1 (de concentración x_1) es proporcional a la diferencia entre la concentración externa X y la interna x_1 . Un caso sencillo son los azúcares o los aminoácidos. El material importado a_1 puede formar, en una reacción reversible mono molecular, un compuesto a_2 de concentración x_2 (por ejemplo monosacáridos que se transforman en polisacáridos, aminoácidos en proteínas). Por otra parte la sustancia a_1 puede catabolizarse en a_3 mediante una reacción irreversible (por ejemplo oxidación, desaminación); a_3 puede ser eliminada del sistema en forma proporcional a su concentración.

El lazo de retroalimentación es termodinámica y cinéticamente cerrado: aunque responde a estímulos, no puede crecer, reproducirse o mantener sus estructuras. Su entropía sólo puede aumentar.

El sistema abierto puede decrecer la entropía, lo cual equivale a decir que su capacidad de información puede aumentar, mientras que en el lazo de retroalimentación la información sólo puede decrecer.

El mantenimiento de un estado, la equifinalidad, es posible en los lazos de retroalimentación, tal como se vio en el ejemplo del termostato, pero esto se hace sólo de manera reactiva, es decir, de una sola forma para cada condición. Son estados de equilibrio. En los sistemas abiertos, como ya se ha indicado, el mismo estado equifinal puede alcanzarse por diversos procesos. Son estados estables.

Los sistemas intencionales pueden explicarse mediante lazos de retroalimentación en un sistema cerrado; los intencionados, no. Así los sistemas abiertos tienden a estados de mayor organización gracias a las propias condiciones del sistema. Los sistemas retroalimentados también pueden alcanzar estados de mayor organización pero de manera reactiva, mediante mecanismos de aprendizaje: información suministrada por el ambiente.

Jordan (citado por Skyttner, p. 178) dice que un sistema manifiesta un propósito cuando internamente procesa una entrada en una salida: es un sistema intencional (purposive). La salida es una meta deseada.

Por ejemplo, el regulador de Watt el cual se ilustra en la figura 4.10 (Pékeli, 1977, p. 11).

Regulador de Watt (sistema cerrado)

Fig. 4.10

La idea es fijar una velocidad angular de referencia ωr . Como se puede ver, el eje del mecanismo está fijado al eje de rotación de la máquina a controlar. Si la velocidad aumenta, las esferas se separan debido a la fuerza centrífuga; el mecanismo de palanca cierra la válvula de vapor disminuyendo la presión del vapor, por lo que la velocidad de rotación baja, tendiendo al valor prefijado. Si se reduce demasiado, entonces la válvula permitirá que pase más vapor aumentando la velocidad. Evidentemente el sistema tiende a autoorganizarse (es autoregulado), gracias a la interacción del sistema con el ambiente: la admisión de vapor.

En 1970 Heinz Von Förster (Vienés, 1911-2002) hace pública su idea de que en la cibernética, el investigador forma parte del proceso cibernético descrito (2003, Cap. 13). Antes se consideraba aparte del proceso estudiado (una posición clásica en la ciencia, como lo hemos indicado en este texto). Se habló entonces de la Cibernética de la cibernética, o Cibernética de segundo orden. Se pasa de una definición clásica: “El control en el hombre y la máquina” a “La ciencia que estudia los principios abstractos de la organización en los sistemas complejos” Esto incluye todo tipo de sistemas: físicos, tecnológicos, biológicos, ecológicos, psicológicos, sociales o cualquier combinación de los mismos. No sólo estudia en qué consisten tales sistemas, sino cómo funcionan. Esto modifica la posición antes descrita (ver Heylighen y Joslyn, 2001).

La T.G.S. estudia los sistemas en diversos grados de generalidad, mientras que la cibernética se centra en los sistemas dirigidos a metas, sistemas funcionales (diseñados) que tienen alguna forma de control. Ambas son incluidas en lo que se conoce como *Ciencia de los sistemas*.

La cibernética clásica consideraba que la relación entre el sistema tal como es y su representación para estudiarlo, “el modelo”, era prácticamente la misma cosa. Debido a las poderosas técnicas de la cibernética, el conocimiento del sistema en sí era tan profundo, que poca distinción cabía entre “sistema real” y el “modelo del sistema”. De hecho, el sistema descrito era un actor “pasivo”, o en términos de lo ya estudiado, un objeto (*objectum*).

Para la cibernética de segundo orden, un organismo es un sistema (un agente utilizando el término utilizado en computación) que tiene un comportamiento propio, que a su vez interactúa con otro agente, el observador. Y si nos basamos en la mecánica cuántica, esta relación, observado-observador es indisoluble, siendo el comportamiento final el resultado de esta interacción. El observador es un sistema cibernético que interactúa con otro sistema cibernético para

comprenderlo: se necesita una “Cibernética de la cibernética” o una cibernética de segundo orden. El paso de un enfoque a otro se hizo gradualmente y de alguna manera ya estaba implícito en los impulsores de esta ciencia: Ashby, McCulloch, Bateson, Mead... Sin embargo la influencia de este movimiento se ha reflejado en una especialización que ha dejado de lado la importancia de la relación observador-observado. Surgen, pues, los desarrollos en redes neuronales, las interacciones autónomas en robótica, la retroalimentación positiva en los sistemas complejos, la inteligencia artificial, el estudio de los sistemas complejos adaptativos, la vida artificial... Los sistemas intencionados pueden ser estudiados desde esta perspectiva.

La existencia de una interrelación entre dos observadores: quien observa y quien observa al que observa genera una sociedad. Por esto se habla de relaciones sociales. Surge una sociología de tipo constructivista que ha tenido profundo impacto en esta ciencia. El constructivismo es la filosofía que razona sobre la idea de que los modelos no son reflexiones pasivas de la realidad, sino construcciones activas del sujeto. Digamos que en la cibernética clásica, el observador estipula el propósito del sistema. En la de segundo orden, debe estipular su propio propósito.

Por su parte basándose en Von Föster, Niklas Luhmann propone una visión cibernética de la sociología. Un sistema no trivial, autopoyético, es decir, que genera su propio resultado: la sociedad no sólo tiene la capacidad de reproducirse, sino de producirse. Mas esta visión se encontró con una gran dificultad: definir a la sociedad como sistema. Una visión cibernética implica la identificación de un sistema claramente definido. Aquí se hace palpable la dificultad de considerar como sistema real, lo que sólo es un constructo mental, algo que se ha venido enfatizando a lo largo de este texto⁶³.

63. Ideas extraídas de la conferencia del Dr. Răzvan Enache, Octubre 2015, Doctorado interinstitucional en Ciencias Ambientales, U. Cauca, U.T.P., U. Valle.

4.4 Resumen

Las teorías científicas buscan establecer leyes. La T.G.S. no puede ser la excepción. Tras discutir lo que vamos a entender por una ley, destacamos las más generales e importantes de los sistemas: la equifinalidad, la tendencia a una entropía mínima en el caso de los sistemas abiertos, la centralización y la descentralización progresiva, la variedad obligada, la emergencia sistémica, la jerarquización, el acoplamiento y la totalidad. Con estos conceptos, la idea de sistema toma cuerpo y aparece como una herramienta útil para enfrentar fenómenos complejos. Finalmente, hacemos una referencia al concepto de complejidad, el cual será profundizado posteriormente, destacándose la reductibilidad sistémica: aunque los sistemas se conectan entre sí, existe el hecho de que se forman “islas” de subsistemas que pueden ser considerados “aisladamente” lo cual permite que estos sean estudiados.

Se ha establecido una diferencia importante entre el concepto de sistema retroalimentado, de la cibernética, y el de sistema abierto.

Al hablar de cibernética, se ha indicado cómo las ideas de los sistemas generales y de la cibernética se han influido entre sí. La cibernética de segundo orden (y de órdenes superiores) enfatiza la importancia de incluir un nuevo observador: aquel que observa al sistema “observador-sistema”; en otras palabras, pasar de un sistema cerrado, a uno abierto. El ambiente reclama su importancia.

CAPÍTULO 5

FORMALIZACIÓN DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

5.0 Formalización y clasificación

Por lo discutido anteriormente, parece casi obligado asegurar que la formalización de una teoría de sistemas está sustancialmente ligada a la posibilidad de presentar matemáticamente los conceptos básicos y sus aspectos operativos. Recordemos que la formalización de una teoría en su parte esencial implica la proposición de un grupo de axiomas, postulados o hipótesis, la existencia de ciertos conceptos (indefinibles en los sistemas abstractos, poco precisos en los naturales), la definición de ciertas reglas de construcción y la existencia de reglas de inferencia mediante las cuales podamos aseverar que una conclusión, basada en ciertas premisas, es confiable (verdadera en los sistemas abstractos), es decir, que no contradice sino que confirma los hechos observados en la realidad. Y esto se logra con ventaja si el lenguaje utilizado es el de la matemática.

Debemos indicar, sin embargo, que muchas teorías inician procesos de formalización con el esfuerzo, nada sencillo, de la clasificación de los fenómenos que le interesan: es el inicio del establecimiento de las bases teóricas que permitirán posteriormente ampliar la teoría y generar modelos.

Ya indicamos (capítulo 2), que no existe *una* Teoría General de Sistemas. G. Klir habla de una *polifonía de teorías*. En este capítulo daremos algunas ideas relacionadas con estos temas. Trataremos de abarcar aspectos clasificatorios y de formalización.

A. Rapoport (1972. Ver Bertalanffy, 1978 p. 56) dice respecto a la Teoría General de Sistemas:

Hablando estrictamente, la Teoría General de Sistemas no es una teoría a la manera de las teorías científicas. [...] Una teoría científica se propone hallar puntos de contacto entre hechos e, idealmente, dar con las condiciones necesarias y suficientes para que se produzca un conjunto de hechos,

todo lo cual se expresa en el paradigma de una afirmación científica: “si... entonces...”.

En las ciencias más maduras, este paradigma ha adquirido forma matemática. Los puntos de contacto se exponen en ecuaciones matemáticas que relacionan entre sí las cantidades variables. En una ecuación el “si” corresponde a la asignación de variables independientes; el “entonces” a la asignación resultante de valores a las variables dependientes.

[...] Una teoría puede, sin embargo, entenderse en un sentido más amplio que el precedente. Antes de que una teoría esté en condiciones de hacer afirmaciones del tipo “si... entonces...”, es necesario buscar y definir las variables que van a ser objeto de tales afirmaciones. La búsqueda de las variables y definiciones apropiadas pueden también considerarse una investigación teórica. En este sentido más amplio, una teoría puede ser sencillamente un esquema de clasificaciones y definiciones (la definición, por supuesto, es un requisito previo a la clasificación). En este sentido más amplio la Teoría General de Sistemas podría, quizá, considerarse una teoría, ya que en primer lugar emprende la tarea de definir sistema y clasifica después los sistemas de acuerdo con ciertos criterios.

Por estas razones vamos, en lo que sigue, a considerar varias clasificaciones de sistemas para luego estudiar los aspectos matemáticos de dos propuestas teóricas, de varias que hay, para formalizar la T.G.S.

5.1 Clasificación de los sistemas

En la literatura existen varias clasificaciones respecto a los sistemas. Para efectos de este texto consideraremos la de K. Boulding, las de R.L. Ackoff y las de P. B. Checkland. Esta selección no puede tomarse como la escogencia de “las mejores”. Simplemente son útiles para el estudio de temas posteriores.

5.1.1 Clasificación de los sistemas: Keneth Boulding

Este autor (1956) aclara que existen dos caminos que se complementan para desarrollar un “sistema de sistemas”. Uno consiste en tomar fenómenos generales de diferentes disciplinas y tratar de construir un modelo general que los

explique. Un buen ejemplo es el estudio de los diferentes tipos de crecimiento: poblacional, monetario, de información, que dio como resultado una teoría general sobre el crecimiento. En otras palabras, la búsqueda de isomorfismos en diferentes áreas de interés. "El otro camino es encuadrar los campos empíricos en una *jerarquía de complejos organizacionales* partiendo de una unidad de comportamiento afín a cada nivel, y tratar de desarrollar un nivel de abstracción apropiado a cada uno", lo que está de acuerdo con la idea de Rapoport como acabamos de indicarlo. Este es el camino tomado por Boulding para proponer su jerarquización de niveles sistémicos. En esta clasificación, el lector debe observar cómo, a medida que se asciende en la jerarquía, cada nuevo nivel posee propiedades que los niveles anteriores no tienen. Hay, pues, emergencia sistémica. Nueve son los niveles propuestos por este autor. Haremos un resumen al respecto.

- 1) El primer nivel es el de las estructuras estáticas. Es el nivel de los marcos de referencia. Es la "anatomía y geografía del universo". Los patrones de los electrones alrededor del núcleo, cómo se interrelacionan los átomos en una fórmula molecular, la organización de átomos en un cristal, la estructura del gen, de la célula, de la planta, del animal, la cartografía de la tierra, el sistema solar, el universo astronómico. La descripción precisa de estos marcos es el inicio de un conocimiento teórico organizado en casi cualquier campo ya que sin una descripción precisa de estas estructuras estáticas, no es posible establecer una teoría funcional o dinámica aceptable.
- 2) El siguiente nivel es el de los sistemas dinámicos sencillos, perfectamente predecibles, que alcanzan estados predeterminados de equilibrio. Podríamos denominarlo el nivel de los mecanismos de relojería. El sistema solar es el gran reloj del universo desde el punto de vista del ser humano, y la exactitud en las predicciones hechas por los astrónomos dan fe de la excelencia de este reloj. Máquinas sencillas como la palanca o la polea, o más complejas como una máquina de vapor y las dínamos caen en esta categoría. Igual ocurre con gran parte de la estructura teórica de la física, de la química y aún de la economía. Este tipo de sistemas se consideran como sistemas cerrados.
- 3) El tercer nivel es el de los mecanismos de control o sistemas cibernéticos. Es el nivel del termostato. Se diferencia de los sistemas sencillos en equilibrio ya que la transmisión e interpretación de la información es parte esencial del sistema. El sistema tiende a la estabilidad mediante procesos de regulación y control. Se destaca el concepto de retroalimentación.

- 4) Este nivel es el de los sistemas abiertos o que mantienen su estructura. Aquí “la vida comienza a diferenciarse de lo que no es vida”. Podríamos llamarlo el nivel de la célula. Va desde los sistemas abiertos más sencillos (estructuras atómicas, estructuras moleculares) hasta aquellos que poseen la propiedad de autorreproducción. Los sistemas se autoorganizan. De aquí en adelante están los sistemas que reclaman un enfoque sistémico.
- 5) El quinto nivel es de tipo genético-social. Es el nivel de la planta. En éste se presenta una diferenciación del trabajo entre las células para formar una sociedad celular con partes diferenciadas e interdependientes (raíces, hojas, semillas, etc.), y además, con una clara diferenciación entre los genotipos y los fenotipos, asociados con el fenómeno de equifinalidad. Poseen receptores de sensación e información muy limitados.
- 6) Pasamos ahora al nivel del reino animal. Se caracteriza por su mayor movilidad, comportamiento teleológico y capacidad de estar alerta. Aparecen receptores de información especializados (ojos, oídos, etc.), fundamentales para poder moverse, que permiten manejar una enorme cantidad de información, la cual es organizada a través de un sistema nervioso y controlada por un cerebro obteniéndose estructuras cognitivas o “imágenes” generadas por la relación estímulo-respuesta.
- 7) El siguiente es el nivel humano. Es el individuo. Además de las características del nivel 6, el ser humano posee autoconciencia, que es diferente al simple estado de alerta: “no sólo sabe, sino que sabe que sabe”, lo cual posiblemente esté relacionado con el lenguaje y el simbolismo⁶⁴. Puede hablar, es decir, es capaz de producir, asimilar e interpretar símbolos, muy diferente a la habilidad del grito de alerta de los animales. Es, además, consciente de su muerte.
- 8) Nos encontramos ahora en el nivel de las organizaciones sociales, muy relacionado con el nivel anterior. El ser humano es un ser fundamentalmente social. Es de mucha importancia el concepto de “rol” o papel. Como individuo, pertenece al nivel 7; al interactuar con otros individuos y asumir un papel, el concepto de organización toma cuerpo. El contenido y la significación de los mensajes, los sistemas de valores, el recuento de la historia, el arte y las emociones son aspectos distintivos en este nivel⁶⁵.

64. H. Maturana sostiene que “lo central del fenómeno social humano es que se da en el lenguaje, y lo central del lenguaje es que sólo en él se dan la reflexión y la autoconciencia”. (2004, p. 83).

65. La interrelación de estos dos niveles es tal vez mayor que la que pueda existir entre cualquier otro par de niveles consecutivos de la jerarquía descrita. Como dice

9) Estamos ahora en el nivel de los sistemas trascendentales. Son los absolutos, los inasibles, los incognoscibles. Son las preguntas sin respuesta. El motor del pensamiento humano.

Boulding aclara que existen modelos teóricos que llegan al cuarto nivel. El conocimiento empírico (aplicado) es débil en casi todos los niveles. Aún en el primer nivel, carecemos de un conocimiento avanzado para una descripción adecuada de estructuras complejas. Para comprender esto último, bástenos con pensar en la gran dificultad que se presenta al catalogar libros, música, obras de arte. ¡Y esto corresponde al primer nivel!

¿En cuál nivel incluiríamos el péndulo de Galileo? Si lo consideramos como el esquema propuesto en la figura 1.1, estará en el primer nivel. Pero si consideramos el sistema definido por el modelo matemático, pertenecería al segundo nivel.

¿Y la familia? Si sólo nos interesan las relaciones de autoridad-responsabilidad, es decir su estructura fundamental, estaríamos en el primer nivel. También podríamos asimilarla al segundo nivel, si tenemos en cuenta algunos aspectos dinámicos simples como dar órdenes, hacer tareas repetitivas, alimentarse... Si se mira como formando parte del tercer nivel debemos incluir aspectos de autorregulación: reglas que deben cumplirse tales como hora de llegada de los hijos al hogar, hora en la cual deben servirse los alimentos, hora en la cual debe tomar la ducha cada uno de los integrantes de esta comunidad... Puede mirarse como un sistema abierto, que en parte autogenera y afecta sus propias estructuras y procesos; estaríamos considerando la familia en cuestión como un modelo de cuarto nivel. Ascendiendo en la escala de complejidad, podemos incluir partes (subsistemas) especializadas para cumplir ciertas funciones: el padre trabaja, la madre se ocupa de las tareas de la casa, los hijos estudian..., es decir, el nivel cinco de la propuesta de Boulding. Yendo un poco más lejos, podríamos incluir elementos sofisticados de procesamiento de información y una dinámica de comportamiento y administración teleonómicas. Como modelo del séptimo nivel, la familia debe considerarse como poseedora de autoconciencia como resultado de las interacciones entre sus integrantes. Pero el modelo que definitivamente la define mejor es el correspondiente al octavo nivel: la familia como un sistema social. Este ejemplo resalta las opciones que existen para modelar sistemas desde diferentes perspectivas. Esta observación se complementará con las clasificaciones de Ackoff que indicaremos enseguida.

Maturana: "[...] de una manera inevitable el ser humano individual, es social, y el ser humano social es individual" (*Ibid.* p. 72).

5.1.2 Russell L. Ackoff: clasificación según el comportamiento

Hay dos clasificaciones que vamos a utilizar de este autor (2002, p. 28-45). Para precisar las ideas que hay en ellas, debemos primero definir algunos conceptos relativos a los sistemas.

En su artículo sobre conceptos de sistemas (1971), este autor define, entre otros temas, lo que se entiende por evento, reacción, respuesta, acto y comportamiento.

Un *evento* es un cambio en una o más de las propiedades estructurales de un sistema o de su ambiente en un período específico. Por ejemplo, encender el bombillo de un cuarto, cuando cae la noche. Aquí hay dos eventos: uno en el sistema y otro en el ambiente (si consideramos como sistema el cuarto y como ambiente lo que lo rodea). Otros eventos son mover un brazo, hablar si estábamos callados, salir de un cuarto...

Una *reacción* de un sistema es un evento o suceso para el cual otro evento que ocurra en el sistema o en el ambiente, es suficiente. Si para encender un bombillo que no está dañado es suficiente con accionar un interruptor, entonces el bombillo reacciona ante esta acción. Un salto de sorpresa ante una acción inesperada como un grito, es también una reacción (siempre y cuando la persona no tenga problemas auditivos).

Una *respuesta* de un sistema es un evento del sistema para el cual la ocurrencia de otro evento en el sistema o en su ambiente es necesario pero no suficiente. Por lo tanto, “una respuesta es un evento del cual el sistema mismo es coproductor”. Para responder ante una pregunta, es necesario que me interroguen; pero no es suficiente: podría muy bien no querer responder. Tratemos de aclarar un poco más las dos últimas definiciones.

Es suficiente que se dé *A* para que ocurra *B*: sin embargo *B* podría ocurrir sin que se dé *A*; así, si me gritan (*A*), salto (*B*), pero esto no quiere decir que no pueda saltar por otra razón.

Es necesario que se dé *A* para que ocurra *B*: *B* no puede ocurrir si no se da *A*, pero la sola existencia de *A* no garantiza que *B* ocurra. Así, para yo responder es necesario que me pregunten; pero dar una respuesta también implica que tenga conocimientos respecto a la pregunta o que tenga el deseo de darla; por lo tanto podría no responder.

Podemos añadir que una condición suficiente, permite predecir que un evento ocurrirá, que está relacionado con la relación causa-efecto. Por su parte, la condición necesaria descubre elementos que son responsables de que el evento ocurra. Causalidad múltiple.

Un *acto* de un sistema es un evento del sistema para cuya ocurrencia no es necesario ni suficiente que existan cambios en el ambiente del sistema. Los actos son, pues, eventos auto determinados por el sistema. Internamente los cambios son *necesarios y suficientes* para que ocurra el acto. Los actos pueden ser reactivos, de respuesta o autónomos, o combinaciones de estos. Salir corriendo del salón de clase porque está temblando es un acto, bien sea porque la adrenalina me impulse a hacerlo, o porque decida salir en lugar de quedarme. Los actos no son exclusivos de los seres humanos. Un robot puede también realizar actos: puede producir cambios en sus propios eventos o en el ambiente por su propia dinámica.

El *comportamiento* de un sistema “es un evento (eventos) del sistema que es (son) necesario(s) y suficiente(s) para que ocurra otro evento en el sistema o en el ambiente”⁶⁶.

El comportamiento es un cambio en el sistema que desencadena otros eventos. Nótese que las reacciones, respuestas y actos son eventos del sistema cuyos *antecedentes son de interés*. El comportamiento consiste en los eventos del sistema *cuyas consecuencias son de interés*. Desde esta perspectiva, las reacciones, respuestas o actos pueden ser comportamientos.

Veamos, pues, la siguiente clasificación de Ackoff.

5.1.2.1 Clasificación de acuerdo al comportamiento del sistema

Ackoff propone una clasificación de los sistemas de acuerdo con su comportamiento. La tabla de la figura 5.1 la resume.

Haremos una aproximación intuitiva a esta clasificación. El lector que desee profundizar un poco este tema puede consultar el APÉNDICE, literal A.5.1.

66. En psicología el comportamiento se refiere a las acciones (respuestas) o reacciones de un objeto u organismo, generalmente con respecto al ambiente. Puede ser consciente o inconsciente, manifiesto u oculto, voluntario o involuntario.

Tipo de sistema	Comportamiento del sistema	Resultado del comportamiento
Que mantiene un estado.	Variable pero determinado (de reacción).	Fijo.
Que busca una meta.	Variable y de escogencia (de respuesta).	Fijo.
Que busca múltiples metas y es intencional.	Variable y de escogencia.	Variable pero determinado.
Intencionado.	Variable y de escogencia.	Variable y de escogencia.

Clasificación de los sistemas según su comportamiento

Fig. 5.1

Un sistema que mantiene un estado es un sistema reactivo que, una vez dados ciertos eventos, tiende a un mismo estado. Tal es el caso de una brújula: si uno modifica su estado actual (por ejemplo, girarla 20 grados) ella regresará a la posición que marca el norte geográfico.

Los sistemas que buscan una meta son sistemas responsivos. Ante diferentes eventos iniciales, puede utilizar diferentes “camino” para llegar a una misma meta. Así, cuando un avión desciende abruptamente, el piloto automático responde mediante diversos mecanismos para recuperar la altura que traía antes del evento. La meta alcanzada depende de los eventos iniciales.

Un sistema que busca múltiples metas es uno que busca una meta a partir de ciertos eventos, pero busca otras ante eventos diferentes a los anteriores. En el ejemplo del avión, si consideramos el sistema de vuelo automático, éste trata de mantener el avión con la misma velocidad (una meta), a la misma altura (otra meta) y con el mismo rumbo (otra meta). Los eventos determinan el estado final.

Un sistema intencional es uno de múltiples metas las cuales tienen una meta (objetivo) común: una intención. Volviendo al caso del avión, si el propósito de los diseñadores del sistema automático de vuelo es la seguridad del vuelo, entonces tendríamos un sistema intencional. Aquí, también, los eventos determinan el estado final.

Finalmente un sistema intencionado tiene la opción de responder de forma diferente ante eventos iguales. Es el caso excepcional en el cual los eventos iniciales no determinan el estado final. Podríamos imaginarnos un programa sofisticado de computador que ante el mismo evento pudiera alcanzar metas diferentes. En tal caso, parecería que el computador tuviera la capacidad de decisión: tuviera voluntad. El ejemplo típico de estos sistemas son los sistemas de la actividad humana⁶⁷.

Amplíemos un poco más lo anterior. Anteriormente usamos el concepto de teleología. Ella trata de explicar los fenómenos que son dirigidos hacia un fin, hacia una meta futura. Esto implica que, un fenómeno que es teleológico, no está condicionado por circunstancias pasadas o presentes, sino por “causas futuras”. El problema, desde el punto de vista de la ciencia, es que la causalidad implica fenómenos que preceden a otros (aunque, para el caso de la mecánica cuántica, esto no es siempre así). En concreto, aquí no opera el “flujo del tiempo” que va, de un pasado a un futuro y jamás a la inversa.

Los conceptos teleológicos, que fueron resaltados por los griegos, particularmente por Aristóteles, fueron relegados por Galileo y Newton, reemplazando las causas finales por las causas eficientes, como ya se comentó anteriormente.

Sin embargo, en la T.G.S. (y sus ramas afines como la cibernética), “la teleología” se revivió a través del concepto de teleonomía como ya se ha explicado. Surge el concepto de “propósito” (meta, objetivo).

Un sistema puede tener, o no, propósitos: dirigirse o no al logro de una o varias metas u objetivos. Tales propósitos pueden ser intencionales o intencionados. Debemos aclarar que estos dos términos tienen aquí significados más precisos que las definiciones halladas en los diccionarios.

Los propósitos intencionales tienden a una meta y objetivos gracias a mecanismos o relaciones que permiten observar un comportamiento que busca lograr algo predeterminado. Un robot que pinta un automóvil, un avión que

67. En filosofía el término intención, intencional tiene un significado diferente al que no nos referiremos aquí.

se estabiliza, mediante un sistema automático de control, frente a los cambios generados por la dirección del viento y de la densidad del aire, así como la búsqueda de refugio de los seres vivos ante un peligro no previsto, son ejemplos de este tipo de comportamiento. Son mecanismos de reacción, fundamentalmente.

Por otra parte, los propósitos intencionados surgen de opciones alternas, aún ante causas similares; el sistema es responsivo. Podemos comer si sentimos hambre, pero también podemos hacerlo por placer. Se observa cierta voluntad, cierta capacidad de decidir. Si podemos fabricar un robot que, ante circunstancias iguales o similares, pueda realizar tareas diferentes según convenga, ya su comportamiento no sería intencional, sino intencionado. A esto es lo que apunta la inteligencia y la vida artificial. Implica una interacción continua del sistema con su entorno o ambiente.

El lector podría entrenar un poco su imaginación tratando de dar ejemplos de cómo conceptuar a una familia modelándola de acuerdo a estos tipos de sistemas propuestos por Ackoff.

5.1.2.2 Clasificación organizacional

Otra clasificación de los sistemas se deriva de la perspectiva organizacional. Se trata de una herramienta para la comprensión sistémica de la administración actual. Se consideran tres tipos básicos de sistemas que, a su vez, generan tres tipos de modelos administrativos y, un cuarto tipo, un metasistema, que los contiene: el sistema ecológico. Los básicos son:

- 1) *Determinados*: son los sistemas y modelos en los cuales ninguna de las partes ni el todo son intencionados. Son reactivos.
- 2) *Animados*: los sistemas y modelos en los que el todo es intencionado, pero las partes no. Son reactivos en cuanto a las partes y de respuesta, con respecto al todo.
- 3) *Sociales*: En estos sistemas y modelos algunas de sus partes son sistemas determinados y animados, mientras que el todo es intencionado. Son sistemas responsivos.
- 4) *Ecológicos*. Están formados por sistemas determinados, animados y sociales. Aunque algunas de sus partes son intencionadas, el todo no lo es.

Hagamos aquí una aclaración, utilizando las ideas de F. Capra y P. L. Luisi (2014 p. 163-). James Lovelock propuso la interesante teoría de que la atmósfera de la tierra es un sistema abierto, lejos del equilibrio, que conserva, a pesar de todas sus interacciones con los elementos del planeta y con la radiación solar, una composición química estable, gracias a la existencia de la vida. Incluso se ha ido más allá, y considerar la tierra (Gaia) como un organismo vivo.

Para que un sistema complejo se considere vivo debe cumplir con tres niveles diferentes de organización: autoorganización (mantener una estructura organizada, mediante reglas internas, a pesar de la influencia del entorno); autopoiesis (capacidad de autorregenerarse a partir de sus componentes); y conocimiento, fruto de la autopoiesis (reconocimiento del entorno). Con estas ideas se puede deducir que el planeta como un todo, es similar a los sistemas vivientes. Lo que los ecologistas llaman *El sistema Tierra*.

Volvamos a nuestra clasificación. La intención o propósito implica que existe una capacidad de decisión, un despliegue de voluntad, tal como se aclaró en la clasificación del numeral anterior. Estos tipos de sistemas son jerárquicos: los animados están compuestos de sistemas deterministas como subsistemas o partes que los componen, no a la inversa; similarmente, los sociales tienen sistemas animados como partes constituyentes, pero no lo contrario. Los sistemas ecológicos son una excepción a esta regla.

Estos sistemas pueden analizarse a la luz de ciertos aspectos tales como funcionalidad o intencionalidad, reemplazo de las partes, capacidad de reacción o respuesta, manejo de la información y capacidad de adaptación.

En los *sistemas determinados* dijimos que no existe intencionalidad ni en el todo ni en las partes. El comportamiento está delimitado y posee funciones. Por ejemplo, un reloj es un sistema de este tipo. La función del reloj (para lo que fue construido) es dar la hora; sus partes también tienen funciones específicas; así algunas de ellas deben transmitir movimiento a otras partes a una velocidad angular dada. Estos sistemas pueden ser cerrados, y en tal caso el ambiente no ejerce ninguna influencia sobre él, o abiertos en los cuales las propiedades del sistema no sólo están condicionadas por su estructura sino por el ambiente que lo rodea. Las plantas también forman parte de este tipo de sistema: ni ellas ni ninguna de sus partes tienen un propósito. Las partes de estos sistemas pueden reemplazarse con cierta facilidad, en la mayoría de los casos. Ellos, además, reaccionan ante cambios que pueden afectarlos, mas no responden. Esto significa que la reacción obedece a leyes que gobiernan al

sistema y no depende del sistema en sí. Estos sistemas no manejan la información. Aunque existen interrelaciones (¡de lo contrario no serían sistemas!) la información que fluye no tiene otra consecuencia que mantener la función (o funciones ya que puede existir más de una) que los caracterizan.

Los *sistemas animados* tienen finalidades que les son propias, pero sus partes no. Ha existido la tendencia a considerarlos como mecanismos complicados. Es el *mecanicismo* al que hicimos referencia en el capítulo 2. Reemplazar sus partes es mucho más complicado que en el caso de los sistemas determinados: aun disponiendo de la parte, las interacciones entre ellas y las leyes que gobiernan a este tipo de sistema, así como la influencia del ambiente, dificultan esta operación⁶⁸. También sus partes reaccionan, mas no responden; estas reacciones están muy interrelacionadas; sin embargo, todo el sistema puede responder ya que puede desplegar voluntad. El flujo de información tiene como objetivo fijar la estabilidad del sistema a través de mecanismos de regulación y control. Los seres vivos pertenecen a este grupo. El sistema tiene, pues, un propiedad emergente. Ejemplos son el termostato, el ser humano.

Los *sistemas sociales* poseen propósito tanto en el todo como en algunas de sus partes. Generalmente su ambiente es otro sistema social. En este caso, el reemplazo de sus componentes (subsistemas) es muy complejo, sino imposible, ya que es alterado seriamente debido a que las partes pueden intervenir en forma activa y efectiva. La información es procesada y afecta al sistema puesto que está relacionada con su capacidad de respuesta. Se han hecho intentos de explicar estos sistemas mediante modelos mecanicistas y animados. Los modelos de J.W. Forrester en sistemas sociales son considerados un ejemplo de mecanicismo aplicado a ellos. Por su parte, el *organicismo* como metáfora de las organizaciones es un intento de modelar sistemas sociales a partir de modelos animados.

Finalmente, los *sistemas ecológicos* están formados por sistemas mecanicistas, organicistas y sociales, pero no poseen una finalidad por sí mismos. Son un ambiente fundamental para los otros sistemas. Pueden ser afectados por los comportamientos y las propiedades de los sistemas que los componen, pero los efectos están determinados. Ackoff ejemplifica cómo los efectos del fluoruro-carburo en la capa de ozono están determinados por leyes físico-químicas y no son un asunto de elección.

El péndulo de Galileo claramente es un sistema determinado. ¿Y la familia?

68. Pensemos en los trasplantes de órganos, por ejemplo.

El ejercicio que hicimos en el caso de la clasificación de Boulding nos permite situarla como sistema determinado cuando la clasificamos dentro de los tres primeros niveles de dicha clasificación.

Si consideramos como uno de sus propósitos velar por la integridad física y moral de sus integrantes, entonces tendríamos a la familia concebida como un sistema animado. Para que se considere como un sistema social, es necesario integrar la familia a otros núcleos familiares que tengan propósitos comunes. Podríamos pensar en algunos vecinos del barrio o condominio donde viva la familia en cuestión. Como vemos, no es un ejercicio sencillo clasificar, como sistema, a uno de tipo social. Dependerá de la perspectiva con que se mire.

Una de las preocupaciones de este autor y en la cual insiste, es el error continuamente cometido de aplicar modelos de niveles inferiores a niveles superiores. Esta misma observación es válida para la clasificación de Boulding, lo que no quiere decir que, en ocasiones y de acuerdo con ciertas circunstancias esto no pueda hacerse. En casos particulares, los modelos mecanicistas son buenas aproximaciones a casos animados, y modelos animados han sido útiles para explicar, en principio, algunos modelos sociales. Pero esto es la excepción, no la regla. En el capítulo 13 haremos uso de estas ideas para un caso práctico.

5.1.3 Clasificación de P. B. Checkland

En su artículo “A Systems map of the Universe” Checkland (1971) piensa que es razonable postular que cualquier disciplina intelectual descansa finalmente en alguna *propuesta* que debe ser “verdadera” si la disciplina es válida. Si la física es una disciplina, deben existir una serie de fenómenos que en su conjunto la forman; tales fenómenos están relacionados con los cambios de energía, momento, posición pero no de la forma molecular. En el caso de la química, estos fenómenos estarían relacionados con la composición y las propiedades de la materia. En psicología diríamos que son los fenómenos relacionados con el estudio de los procesos mentales y de la conducta del individuo.

El estudio de los sistemas debe regirse por un postulado igual. La propuesta en este caso es que el universo, aparentemente caótico, es un complejo de sistemas que interactúan. Si los sistemas tienen objetivos definibles, entonces es posible estudiarlos, y hasta cierto punto, manejarlos.

Los sistemas básicos propuesto por este autor son:

1. Sistemas *naturales*.
2. Sistemas *diseñados* (*físicos y abstractos*).
3. Sistemas *de la actividad humana*.
4. Sistemas *sociales y culturales*.
5. Sistemas *trascendentales*.

Una primera división destaca a los *sistemas naturales* que son los sistemas físicos que constituyen el universo; van desde los sistemas subatómicos (que dan origen a los sistemas de seres vivos y no vivos), hasta los galácticos en el otro extremo, pasando por los sistemas vivos. En una jerarquía superior están los *sistemas trascendentales*, los que están más allá de nuestro conocimiento actual.

La figura 5.2 muestra la jerarquización de estos sistemas.

Clasificación de los sistemas (P. B. Checkland)

Fig. 5.2

Los *sistemas diseñados*, pueden ser *físicos* que se relacionan con los sistemas de los metales y otros materiales, que han originado las herramientas (desde las más primitivas como el martillo, hasta las más sofisticadas como los sistemas de control) con las cuales las civilizaciones han logrado su desarrollo; o pueden ser *abstractos*: tal es el caso de los sistemas filosóficos, los matemáticos y el lenguaje. Los *sistemas de la actividad humana* están integrados fundamentalmente por el ser humano, con su capacidad para hacer herramientas, crear mitos, modificar el ambiente y su capacidad de realizar actividades con propósitos

definidos. Por una parte, son un sistema social y, por otro, un sistema de actividades que dicho grupo ejecuta. Ejemplos son los sistemas hombre-máquina, las actividades industriales, los sistemas políticos, la administración. Esta distinción permite identificar lo que podemos entender por *estructura* y por *proceso* en estos sistemas. La figura 5.3 ilustra estos conceptos.

Clasificación ampliada de los sistemas

Fig. 5.3

Los *sistemas sociales y culturales*. Estos son un caso especial. Muchos sistemas de la actividad humana existen cómo o dentro de un sistema social. Pero, por

otra parte, y por estar integrados por seres humanos de espíritu gregario y con necesidades básicas qué satisfacer, pertenecen también al mundo natural. Están “a caballo” entre estos dos sistemas. Por esta razón son tan difíciles de comprender y son un reto muy importante para la ciencia de los sistemas. La figura 5.3 destaca este hecho. El péndulo de Galileo cae dentro de los sistemas abstractos diseñados. Si se construye, se convierte en un sistema físico diseñado. Por su parte, la familia forma parte de un sistema de la actividad humana o de un sistema social según como se desee conceptuar. Se hace necesario hacer la distinción. Los sistemas de la actividad humana son sistemas sociales que tienen propósitos comunes. Estos propósitos implican una serie de actividades para poderlos cumplir. Podríamos decir que un sistema de actividad humana es la superposición de un sistema de actividades y un sistema social: el primero indica lo que se debe hacer y el segundo crea las asociaciones necesarias para llevarlas a cabo.

Cuando estudiemos con cierto detalle la metodología de P. B. Checkland podremos aclarar mejor estos conceptos.

Este autor tiene otra clasificación que es muy útil. Se trata de la distinción entre *sistemas duros* y *sistemas blandos*. Más que una dicotomía, se trata de un espectro en el cual estos dos tipos de sistemas forman sus extremos, como lo indica la figura 5.4.

Otra clasificación de los sistemas según Checkland

Fig. 5.4

Un *sistema duro* se caracteriza por tener objetivos claramente definidos, una estructura identificable y procesos de decisión que poseen medidas cuantitativas de comportamiento, es decir que están claramente identificados. Por el contrario, un *sistema blando* no tiene objetivos fácilmente definibles o identificables, su estructura es “difusa” y los procesos operan bajo condiciones de incertidumbre.

Clasificar un sistema como blando o duro no es, de ninguna manera, una decisión fácil. De hecho, los sistemas no son duros o blandos. Nosotros los de-

finimos como tales según las circunstancias. Por ejemplo, construir un edificio dado parece corresponder al diseño de un sistema duro. El objetivo es exacto, pues el arquitecto entrega un proyecto en el cual el uso del espacio está clara y precisamente delimitado; además, se conocen las leyes que rigen la resistencia de los materiales así como las ecuaciones de las diferentes interacciones de los elementos de la estructura a levantar, por lo que el proceso de construcción está regido por reglas precisas, dictadas por la ingeniería. Pero construir un edificio implica también el manejo de operarios, compra de materia prima, reformas propuestas sobre la marcha por los interesados en la construcción. No siempre los materiales son de primera calidad y en general existe una gran multitud de situaciones que van en contra de las exigencias dictadas por la ingeniería.

Cuando concebimos un sistema con características que lo sitúan hacia el extremo “duro”, el reduccionismo ha demostrado ser una manera bastante eficiente de encarar los problemas que se presentan en él. Sin embargo, a medida que nos movemos en el espectro hacia el lado “blando”, el enfoque de sistemas parece ser la opción más favorable. Tal es la situación que hemos venido analizando a través del texto cuando usamos como ejemplos el péndulo de Galileo (un “sistema duro” y una familia (un “sistema blando”).

A partir de estas clasificaciones podemos retomar el concepto de Teoría General de Sistemas. Como ya lo hemos dado a entender, La Teoría General de Sistemas se ocupa de los principios aplicables a cualquier sistema partiendo de leyes de carácter general tales como la equifinalidad, la centralización-descentralización ya explicadas anteriormente.

Utilizando la clasificación de Ackoff, los sistemas determinados permiten conocer el comportamiento del todo a partir del comportamiento de sus partes. En lo que respecta a los animados y sociales, esto no es posible. Podríamos decir, entonces, que la T.G.S. excluye a los primeros (*Cfr.* numeral 3.4).

Establecer una teoría general de tales sistemas parece una empresa imposible. Sería como exigir la existencia de una Teoría General de la Física. Podemos delimitar la Ciencia Física y distinguirla, por ejemplo, de la Ciencia Química. Pero dada la característica de los fenómenos que cada una de ellas estudia –la física se ocupa de las propiedades y el comportamiento de la energía, la materia, el tiempo y el espacio y sus interrelaciones, siempre y cuando la naturaleza de tales propiedades no sea alterada; por su parte la química se ocupa de la composición, estructura y propiedades de la materia en su relación con la energía, y sus transformaciones en otras sustancias– ellas han desarrollado

diversos métodos según el área de interés: en física hablamos de mecánica, electromagnetismo, mecánica de fluidos, óptica... y en química de química orgánica, química inorgánica, bioquímica, fisicoquímica... Utilizando la idea propuesta por Bergmann (1971, p. 37) estos *ámbitos* (una cierta gama de fenómenos con leyes diferentes entre sí que una teoría debe cubrir), diversos entre sí, dificultan la opción de abarcarlos todos bajo un solo manto.

De manera similar podemos hablar de Ciencias de los sistemas, pero no de una Teoría general de los sistemas. Sería mejor referirnos a una Teoría de sistemas, y aún más, de Sistemas Abiertos o de sistemas emergentes. De esta manera sí sería posible dar una definición de este tipo de sistemas, ya que ella debería excluir aquellos que no poseen la propiedad de estar interrelacionados con su ambiente y tener propiedades emergentes. En este texto, para el caso de la administración, la T.G.S. se preocuparía por los sistemas de la actividad humana, aquellos “sistemas” que surgen por la interacción de individuos interesados en objetivos o propósitos comunes. Situación igual se presentaría para la Teoría de la Complejidad como lo veremos más adelante.

Sin embargo, respetaremos la tradición en estos campos y, con la salvedad hecha, utilizaremos ambas denominaciones en este texto.

En lo que sigue, vamos a considerar la posibilidad de una teoría formal en lo que respecta a los sistemas. Para ello es necesario profundizar un poco más en las leyes de la ciencia, tema ya iniciado en el capítulo 2, numeral 2.9.

5.2 Las leyes numéricas

Páginas atrás distinguimos entre tres tipos de leyes: empíricas, de definición y deducidas. A esta clasificación podemos añadir la característica de ser *descriptivas* (o *cualitativas*) o *numéricas* (*cuantitativas*). La tabla de la figura 5.5 da algunos ejemplos de estas seis categorías.

Para que una teoría adquiera solidez debe pretender que sus leyes sean de tipo numérico, y especialmente de definición o deducidas. Esto no desconoce la importancia de las leyes empíricas. Muchos enunciados que hoy en día son ejemplo de precisión y elegancia, fueron en sus orígenes observaciones directas de ciertas regularidades. Por ejemplo, las leyes de la reflexión y refracción de la luz fueron inicialmente leyes empíricas, aunque de carácter numérico; Posteriormente entraron a formar parte, como leyes deducidas, de la teoría

	Descriptiva	Numérica
Empírica	La mecanización-centralización progresiva.	La densidad: $d = m/V$
De definición	La jerarquización de los sistemas. Totalidad.	La fuerza: es igual al producto de la masa por la aceleración obtenida. $F = ma$
Deducida o Derivada	La equifinalidad (que puede ser deducida de la ley de entropía mínima).	La ley de Snell: $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$ que puede ser deducida de las ecuaciones de Maxwell.

Diversos tipos de leyes

Fig. 5.5

del electromagnetismo de Maxwell. Otro tanto puede decirse de la ley de equifinalidad en los sistemas: inicialmente postulada como una regularidad empírica y no siempre numérica, es posible deducirla cuando forma parte de algunos de los sistemas formales que han sido propuestos para la Teoría de Sistemas. Sin embargo, y esto es lo que nos interesa ahora, las leyes descriptivas no hacen parte de una teoría sólida sino hasta cuando sean leyes numéricas deducidas. Por esta razón, se hace necesario discutir con cierto detalle lo que se entiende por una ley numérica. El establecimiento de este tipo de ley lleva implícita la disponibilidad de un sistema de medición, es decir, la posibilidad de asignar un número a una propiedad dada que conserve alguna propiedad de los números⁶⁹. Conocemos (describimos) los objetos por sus propiedades. Algunas de ellas son “medibles”. Tal es el caso del peso. Cuando decimos que un cuerpo pesa 1.2 kilogramos, estamos asignando un número único a la propiedad *peso* de dicho objeto. Igual ocurre con la longitud y el tiempo. Pero otras propiedades no poseen esta cualidad. Por ejemplo, si nos preguntáramos

69. Propiedades tales como poseer relación de orden, definición de complemento e inverso, operaciones tales como la suma, el producto, la exponenciación...

por la belleza de un objeto que hemos pesado (se trata de un vaso de cerámica del siglo XVI) no estamos en la posibilidad de asignarle un número. La propiedad “belleza” no es medible. En ocasiones podemos asignar números a propiedades en las cuales dicha asignación no es exacta o única. Por ejemplo, cuando un estudiante obtiene una nota de 2.1 en un examen, y otro obtiene 4.2, no podemos asegurar que éste sabe el doble que aquél. Otro profesor podría calificar al primero con 2.4 y al segundo con 3.8. Sin embargo, hay algo que se preserva: la relación de orden; el primero tiene un conocimiento menor que el segundo en lo relacionado con las preguntas hechas en el examen. Esto no es posible con la belleza.

Algunos autores llaman *medición* a la asignación inequívoca de un número a una propiedad, y *cuantificación* a la asignación de números a propiedades cuando se guarda una *relación de orden*: si *A* tiene una propiedad mayor (menor) que *B*, y *B* tiene dicha propiedad mayor (menor) que *C*, entonces *A* tiene la misma propiedad mayor (menor) que *C*. Esta relación es la condición fundamental sin la cual una propiedad puede ser medible. Así, si *A* pesa más que *B* y *B* pesa más que *C*, necesariamente *A* pesa más que *C*. En cambio, no podemos decir que si *A* ama a *B* y *B* ama a *C*, necesariamente *A* debe amar a *C*; bástenos con suponer que *A* es Pedro, *B* es Marta y *C* es Andrés. ¡Pedro y Andrés podrían ser rivales!

Existen mediciones de propiedades fundamentales (o directas): son aquellas que cambian por la combinación de cuerpos semejantes (N. R. Campbell, 1967, Vol.6, p. 187). Por su parte, las mediciones derivadas no poseen esta propiedad; son mediciones que se desprenden de la combinación de mediciones fundamentales. Por ejemplo, si tenemos una varilla de 12 centímetros de longitud, y de densidad 7.8 gm/cm^3 (hierro) y otra de longitud 22 centímetros y de densidad 12.3 gm/cm^3 (titanio) y colocamos una a continuación de la otra, obtendremos un objeto (“varilla”) de longitud 22 cm (la propiedad se suma) pero no de una densidad 12.3 (la suma) o 6.15 (el promedio). La longitud es una propiedad fundamental; la densidad es derivada: es la relación entre la masa del cuerpo y su volumen.

Si observamos varios vehículos que viajan a distintas velocidades, podríamos establecer una relación tal que el número 1 fuera asignado al carro más lento, el número 2 al siguiente más lento y así sucesivamente. Con esto identificaríamos la rapidez con la que viajan: el vehículo 4 es más rápido que el 2 y más lento que el 7, preservándose la relación de orden: $7 > 4 > 2 \rightarrow 7 > 2$. Sin

embargo, esta identificación no es única. Cualquier otra sucesión numérica creciente hubiera prestado el mismo servicio, como por ejemplo $5 > -11 > -23 \Rightarrow 5 > -23$. ¿Podríamos encontrar una serie que, preservando la relación de orden, nos diera además una información única de la propiedad “velocidad”? La respuesta a esta pregunta es el fundamento de las mediciones derivadas. Si definimos la “rapidez” (que llamaremos indistintamente “velocidad”⁷⁰) como el cociente entre la distancia recorrida y el tiempo gastado en dicho recorrido, la cifra resultante será una medida de la velocidad promedio o constante que representará tal propiedad y a la vez preservará la relación de orden. Aunque la suma no es aplicable (dos carros a 20 km/h no dan un carro a 40 km/h), sí lo es la multiplicación (división). El carro que va a 20 km/h va más despacio que el que viaja a 30 4km/h. Más aún, va a una velocidad que es 1.5 veces menor, lo cual implica que tardará un 50% de tiempo más en recorrer la misma distancia (todo esto si la velocidad es constante, naturalmente). Incluso si las unidades de medición cambiaran (de km/h a millas/minuto) los resultados de los análisis anteriores no se modificarían en absoluto a pesar de que los números asignados sean diferentes.

Las leyes numéricas están íntimamente ligadas al concepto de medición derivada (o deducida cuando se obtiene como consecuencia lógica de alguna proposición), invariantes a la modificación del fenómeno. Así, en el caso de la velocidad, si se aumentan las distancias al doble, el tiempo transcurrido deberá ser el doble de inicial, para que el vehículo conserve su misma velocidad. Aunque familiarizados con esta situación, esto no es evidente en sí. Es importante en este tipo de leyes que éstas partan de hechos experimentales.

¿Por qué en las leyes de la naturaleza se presentan este tipo de invariancias en la medición? ¿Por qué podemos representar las leyes mediante el lenguaje matemático? ¿Por qué la suma y la resta se han podido relacionar con situaciones reales? ¿Por qué la multiplicación y la división han permitido hallar invariancias en las propiedades de los hechos naturales? ¿Por qué el campo se ha extendido a otras operaciones como la potenciación, radicación, uso de los logaritmos, etc.? Campbell [en Newman, 1967, vol. 5, p. 206] comenta:

Este proceso de ampliación de las operaciones aritméticas más allá de la simple multiplicación y división, la consiguiente invención de nuevas reglas

70. La velocidad exige, además del valor de la rapidez, una dirección y un sentido: es un vector. La rapidez es un escalar. Sin embargo, en el lenguaje cotidiano usamos la una por la otra.

para relacionar cifras y derivar unas de otras y el estudio de las reglas una vez inventadas es, todo ello, asunto puramente intelectual. No depende de ningún experimento; el experimento no interviene más que cuando nos preguntamos si existe alguna ley experimental que contenga una de las relaciones numéricas inventadas o descubiertas entre propiedades. El proceso es en realidad parte de la matemática, no de la ciencia experimental; y una de las razones por las cuales la matemática es útil a la ciencia es que sugiere nuevas formas posibles de leyes numéricas. Los ejemplos que hemos dado son, desde luego, sumamente elementales, y la matemática actual difiere grandemente de tales consideraciones simples; pero el descubrimiento de reglas de ese tipo lleva lógicamente, si no históricamente, a una de las grandes ramas de la matemática moderna, la Teoría de Funciones. [...] Esta teoría ha sido desarrollada por los matemáticos para satisfacer sus propias necesidades intelectuales, su sentido de claridad lógica y de la forma; pero aunque grandes sectores de ella no tienen importancia para la ciencia experimental, sigue siendo notable la frecuencia con la cual relaciones desarrolladas por el matemático para sus propios fines tienen al final una aplicación directa e inmediata a los hechos experimentales de la ciencia.

Sin embargo existen otras posiciones al respecto. C. A. Pickover [2009, p. 14] escribe:

Me pongo al lado de Martin Gardner y otros cuando sugieren que si la naturaleza suele dejarse describir mediante fórmulas y leyes simples, no es porque nosotros hayamos *inventado* las matemáticas y las leyes, sino porque la naturaleza tiene un aspecto matemático oculto.

Esta idea la expresa Feynman (2010, p. 12) de la siguiente manera:

De esta ley [la ley de la gravedad] se ha dicho que es “la mayor generalización lograda por la mente humana”, aunque ya puede deducirse de mi introducción que no me interesa tanto la mente humana como la maravilla de una naturaleza que es capaz de obedecer una ley tan simple y tan elegante como la ley de la gravedad. En consecuencia no me voy a concentrar en lo listos que somos por haber descubierto todo esto, sino en lo lista que es la naturaleza al obedecer a la ley.

Esta era la concepción que al respecto se tenía en la antigua Grecia.

Benoit Mandelbrot, matemático que desarrolló la teoría de fractales que estudiaremos más adelante, decía (2010, A. Bly, p. 229):

De regreso a la escuela, por cada problema que mi profesor me proponía, yo tenía una solución instantánea –nunca igual a la suya. Mi solución incluía formas. Así, yo tomaba la pregunta escueta que él me hacía, y sin ser particularmente consciente de mi forma de pensar, la resolvía completamente –casi instantáneamente– en término de formas reales. Sin embargo esto no me ocasionaba ningún esfuerzo. ¿Tenía cómo describirlo? Un don extraño. Para cada asunto matemático que me era propuesto, yo siempre veía algo real que tenía las mismas propiedades.

La matemática como lenguaje de la naturaleza permite, en primer lugar, afirmar que si un fenómeno natural es *expresado* mediante relaciones matemáticas entonces automáticamente queda *explicado*. Por otra parte la abstracción de los fenómenos mediante el lenguaje matemático (paso del mundo real al mundo simbólico de la matemática) permite pasar de ese mundo hipotético –en el que rigen las reglas de las matemáticas y que permiten la obtención de nuevos conocimientos (abstractos, simbólicos)– al mundo real, permitiendo corroborar la trascendencia y realidad de estos nuevos descubrimientos.

Aquí es bueno aclarar que la matemática posee tres maneras de ser considerada: como lenguaje, como herramienta de cálculo y como sistema lógico deductivo.

- *Como lenguaje*: la conocida expresión, $h=1/2 gt^2$ nos expresa, en lenguaje matemático, que un cuerpo que cae libremente en el vacío, recorre el espacio en forma directamente proporcional al cuadrado del tiempo que tarda en recorrerlo.
- *Como herramienta*: podemos asegurar que bajo las condiciones descritas, el cuerpo habrá recorrido 78.4 cm en los primeros cuatro segundos ($h=1/2gt^2=1/2 \times 9.8 \text{ cm/seg}^2 \times 16 \text{ seg}^2$).
- *Como sistema lógico deductivo*: si derivamos esta ecuación con respecto al tiempo, obtendremos que $dh/dt=gt$, es decir, deducimos que la velocidad del cuerpo es proporcional al tiempo de caída del mismo y depende de la aceleración de la gravedad.

La tarea para formalizar una teoría de sistemas es clara. En lo posible deben establecerse unidades de medida y a partir de allí obtener definiciones operacionales. Muchas de las leyes conocidas deben obtenerse por deducción. Y la teoría debe proponer nuevos hechos, no observables en principio.

Consideremos ahora dos propuestas, de varias que existen, que intentan llevar a cabo esta importante tarea.

5.3 Hipótesis de la T.G.S

Para fijar ideas, dentro del grupo de teorías que pueden considerarse como basadas en axiomas o propuestas bajo un enfoque matemático podemos citar: la teoría de L. V. Bertalanffy (sistemas de ecuaciones diferenciales), la teoría de las máquinas de estado finito (teoría de autómatas determinados o probabilísticos), la teoría matemática de los lenguajes formales, la teoría de las máquinas de Turing, los enfoques cibernéticos (Winer, Ashby (1956)), la teoría de Wymore (1967) (basada en la teoría de conjuntos), el enfoque de J. W. Forreter, la teoría de G. Klir (1969), la teoría de los sistemas jerárquicos de Mesarović (1970), etc. Del otro lado, de las teorías basadas en hechos empíricos, podemos citar la tectología de Bogdanov⁷¹ (1940; 1975), la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy (1930)⁷², las ideas sociológicas de Pareto, Spencer, Parsons y Durkheim (entre otros), las propuestas metodológicas de Ackoff, la metodología de P. B. Checkland, para sólo citar algunas⁷³.

Vamos a presentar brevemente las ideas de Bertalanffy y Lange, en lo que se refiere a los aspectos formales. Para el caso de los sistemas de la actividad humana nos referiremos mejor al concepto de metodología.

En primer lugar, notemos que deben existir ciertas hipótesis generales que cualquier teoría sobre el tema de los sistemas debe cubrir. Estas son:

Hipótesis 1: el mundo es ordenado (o por lo menos, ordenable⁷⁴).

Hipótesis 2: el mundo puede explicarse (o, cuando menos, concebirse) como formado por sistemas.

Hipótesis 3: los sistemas son jerárquicos.

71. Bogdanov fue pionero en los conceptos sobre sistemas generales. Su obra *Ensayos en Tectología* rescatada por George Gorelik es una lectura obligada para comprender bien los conceptos básicos de los sistemas.

72. El lector podrá sorprenderse que Bertalanffy aparezca en ambas clasificaciones. Bertalanffy propuso una teoría formal, matemática, basada en ecuaciones diferenciales. Sin embargo, muchas otras consideraciones (conceptos, hipótesis, principios metodológicos y técnicas) que no caben en su propuesta matemática deben ser consideradas aparte.

73. El concepto de metodología será desarrollado en el capítulo 9.

74. Sobre esta hipótesis el lector deberá consultar el numeral A.6.7.

5.3.1 La propuesta de L. V. Bertalanffy

Para su formalización, Bertalanffy (1973, p. 55-) propone como definición de sistema un conjunto p de n elementos, $p=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ y un conjunto R de relaciones entre dichos elementos. Un sistema S se define entonces mediante la expresión:

$$S = \{ p, R \} \quad (5-1)$$

De acuerdo con esta definición, si en un sistema se cambian los elementos o las relaciones, el sistema cambia, lo cual está de acuerdo con la definición que hemos dado a lo largo de este texto.

Un sistema puede ser descrito por un sistema simultáneo de ecuaciones diferenciales ordinarias. Sea Q_i una medida de una propiedad del elemento p_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$). Para un conjunto finito de elementos el sistema S puede definirse como en la ecuación (5.2), en donde $f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ es una función que representa las interrelaciones entre los n elementos del sistema.

$$\begin{aligned} dQ_1/dt &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ dQ_2/dt &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\vdots \\ dQ_i/dt &= f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\vdots \\ dQ_n/dt &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Este sistema de ecuaciones es lo suficientemente general como para representar una gran variedad de sistemas complejos. Por esta razón, esta representación se encuentra muy difundida en múltiples ciencias: problemas demográficos, cinéticos, procesos celulares etc. Pero no es la única. Un sistema de ecuaciones diferenciales parciales permite modelar situaciones más complejas.

El sistema (5-2) en el cual los valores de Q_i no dependen del tiempo (es decir no se escribe $(Q_i(t))$) garantiza que, bajo condiciones únicas, el sistema tiene una única trayectoria. El sistema es determinado. Del sistema de ecuaciones

(5-2) es posible deducir muchas de las leyes de los sistemas indicadas en el capítulo 2⁷⁵.

Veamos ahora un par de ejemplos sobre esta manera de concebir los sistemas.

En la naturaleza y en las sociedades el crecimiento es un fenómeno común a varias disciplinas: crecimiento de un individuo o crecimiento de colonias, crecimiento de un capital puesto a interés, crecimiento de la población de una ciudad, crecimiento del conocimiento. Sea un sistema compuesto de un solo tipo de elementos (por ejemplo, una colonia de bacterias). El crecimiento de esta población está íntimamente relacionado con el número de elementos (bacterias) existente en un momento dado. Esta es la propiedad medible en todo instante t y la designaremos por Q (no se agrega subíndice ya que sólo existe una propiedad: $i = 1$). La ecuación que describe este hecho es:

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q) = kQ \quad (5-3)$$

Lo que nos dice la ecuación es que la tasa de cambio de Q (número de bacterias) es directamente proporcional al número de bacterias presentes en el instante t ⁷⁶.

La solución de esta ecuación es:

$$Q = Q_0 e^{kt} \quad (5-4)$$

siendo Q_0 la población inicial, es decir cuando $t = t_0$.

Si k es positivo, la colonia crecerá exponencialmente. Si es negativo, decrecerá hasta la extinción. La gráfica de la figura 5.6 ilustra el caso para una población inicial de bacterias de 10.000 individuos, con una tasa de reproducción del 2% por hora.

En general, un crecimiento ilimitado no existe. Se observan crecimientos exponenciales que, poco a poco, van tendiendo a un límite. Tal es el caso de las poblaciones observadas en la naturaleza. Este tipo de crecimiento puede describirse a partir de la ecuación diferencial (5-5):

75. Una ampliación del tema se encuentra en el APÉNDICE numeral A.5.2.

76. Es fácil observar que este supuesto es igualmente válido para el dinero puesto a interés, o la generación de conocimiento. Se obtiene, pues, un isomorfismo para describir un crecimiento general sin límite.

Crecimiento de bacterias

Fig. 5.6

$$dQ/dt = k_1 Q + k_2 Q^2 \quad (5-5)$$

cuya solución es:

$$Q = k_1 Q_0 e^{k_1 t} / (1 - k_2 Q_0 e^{k_1 t}) \quad (5-6)$$

Esta ecuación es la logística o sigmoide, con Q_0 como condición inicial. La figura 5.7 muestra el caso para valores de $k_1 = 0.1$, $k_2 = -0.01$ y $Q_0 = 1$.

Crecimiento limitado. Curva sigmoide

Fig. 5.7

El valor negativo de k_2 permite que en la ecuación (5-5) dQ/dt decrezca a partir de valores de Q superiores a la condición inicial. Al principio la curva se comporta como una exponencial ya que el segundo término no afecta a los cálculos sensiblemente. Posteriormente este segundo término empieza a controlar el crecimiento exponencial⁷⁷.

Qué ocurre ahora cuando existen dos sistemas, uno compuesto por predadores y otro por presas? En este caso llamaremos Q_p al número de individuos predadores en un momento dado, y Q_v al número de presas (víctimas) en el mismo instante. Podemos postular que los predadores viven mientras existan presas, y las presas mueren por la acción de los predadores. Se supone que esta muerte (y su equivalente en nacimientos de los predadores) depende del número de encuentros entre ambas especies. Matemáticamente es el producto de las poblaciones por un “factor de encuentro” que indicaremos por K . Los nacimientos de las presas se calculan dependiendo del número de individuos presentes en ese momento, tal y como se describió en el crecimiento sin límite, siendo T_v su tasa de nacimiento. La muerte de los predadores dependerá de una tasa de muerte que designaremos por T_p . Las ecuaciones respectivas son:

$$\begin{aligned} dQ_v/dt &= T_v Q_v - K Q_p Q_v \\ dQ_p/dt &= K Q_p Q_v - T_p Q_p \end{aligned} \quad (5-7)$$

Un comportamiento típico se muestra en la figura 5.8.

Observemos cómo oscilan ambas poblaciones. Cuando hay abundantes presas, los predadores crecen rápidamente; al comenzar a extinguir la población de presas, los predadores empiezan a perder individuos. Al disminuir estos, las presas aumentan su población para oscilar nuevamente. El sistema, en este caso, alcanza un estado estable. En caso contrario, el sistema se extingue.

Como indicamos anteriormente a partir de esta teoría es posible deducir las principales leyes de los sistemas. La dificultad práctica de su aplicación para los sistemas de la actividad humana se encuentra en la imposibilidad, hasta la fecha, de encontrar funciones que permitan expresar matemáticamente comportamientos de tipo social. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, la

⁷⁷. Una aproximación numérica a dicha ecuación es la siguiente:

$Q_{t+1}^- = Q_t^- + Q_t^- (k_1 + k_2 Q_t^-)$ en donde Q_t^- es una aproximación numérica del valor de $Q(t)$. Esta ecuación será analizada cuando estudiemos la teoría del caos, numeral 7.1.

Relación predador-presa

Fig. 5.8

propuesta es de gran valor ya que permite presentar, en forma de un sistema lógico deductivo, una Teoría General de Sistemas. Algo similar ocurre con la propuesta de O. Lange.

5.3.2 La propuesta de O. Lange

Para Lange (1975), un sistema está compuesto por un conjunto de “elementos activos” que interactúan entre sí. Un elemento activo posee por lo menos una entrada y una salida, y no puede influirse a sí mismo. El elemento activo es la menor división a la que se puede llegar en un sistema dado⁷⁸.

La figura 5.9 muestra el elemento activo E_r con m entradas representadas por el vector $\mathbf{X}^{(r)} = [x_1^r, x_2^r, \dots, x_m^r]$ (por ejemplo, presión, voltaje, estímulo...) y n salidas (presión, temperatura, longitud de onda...) representadas por el vector $\mathbf{Y}^{(r)} = [y_1^r, y_2^r, \dots, y_n^r]$.

Podemos escribir, como relación válida para la figura 5.9:

$$\mathbf{Y}^{(r)} = \mathbf{T}^{(r)}(\mathbf{X}^{(r)}) \quad (5-8)$$

78. El elemento activo es una “caja negra”. No nos interesa cómo está compuesta. Solo importa conocer las entradas, las salidas y las relaciones entre ellas.

Elemento activo

Fig. 5.9

Debe existir una transformación que permita medir la relación entre los estados de entrada y los de salida del elemento activo E_r ; la denominaremos por $T^{(r)}$.

Esta expresión permite calcular las salidas de elemento activo con base en sus entradas.

Es posible establecer acoplamientos entre elementos activos, de tal manera que algunas (o todas) de las salidas de uno de ellos, se acople a algunas (o todas) de las entradas del otro. Incluso, un elemento activo puede influir en otro elemento que le antecede, formando un lazo de retroalimentación como se ilustra en la figura 5.10.

Acoplamiento de elementos activos

Fig. 5.10

Estos acoplamientos se describen mediante una “matriz de acoplamientos” en la cual un 0 indica que no hay relación entre la salida de un elemento con la entrada de otro con que se relaciona, y 1 en caso contrario. Al conjunto de todas las matrices de acoplamiento Lange la llama la “estructura del sistema” y la denomina por S . Si designamos por T a la matriz de todas las transformaciones $T^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, n$ para un total de n elementos activos, es posible demostrar que si los elementos activos están acoplados de acuerdo como lo indica la matriz S , el sistema puede ser descrito por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} X' &= TS(X) \\ Y' &= ST(Y) \end{aligned} \tag{5-9}$$

en donde X' y Y' son los nuevos estados de las entradas y salidas debido al acoplamiento (en álgebra matricial $TS \neq ST$).

Lange (*Op. Cit.* p. 39) dice:

Como puede verse, el modo de acción del sistema depende tanto de la matriz T de modos de acción de los elementos, como de la matriz estructural S del sistema. Para poder determinar el modo de acción del sistema, no es suficiente conocer los modos de acción de los elementos, los cuales son expresados matemáticamente por la matriz T , sino que es necesario conocer también la matriz estructural S del sistema, la cual representa la red de acoplamientos de los elementos.

La transformación de los estados de entrada y de salida de los elementos crea una “ley de movimiento” del sistema formado por elementos activos. De este análisis puede observarse cómo los mismos elementos, con modos de acción iguales pero acoplados de manera distinta, constituyen un sistema diferente con un modo diferente de acción del sistema (la matriz S será diferente). Nótese que el comportamiento (modos de acción) de los “todos” (del sistema global), no son deducibles de los modos específicos de acción de los elementos individuales. Los “todos” son simplemente “conjuntos de elementos acoplados”; en otras palabras, “sistemas”. Sus modos de acción constituyen el resultado combinado de los modos de acción de los elementos individuales y de la estructura del sistema, por ejemplo, de la red de acoplamiento de los elementos que lo componen.

El análisis anterior supone que el “tiempo de reacción” entre los efectos que causa la entrada en la salida es instantáneo. Sin embargo, si existe un tiempo dado para tal reacción entre cada componente de salida y cada componente de entrada, se puede extender el análisis a tal situación, con conclusiones similares a las anteriores. Si θ es el máximo valor entre todos los tiempos de reacción de las diferentes componentes de un elemento activo, entonces:

$$\begin{aligned} X_{t+\theta} &= TS(X_t) \\ Y_{t+\theta} &= ST(Y_t) \end{aligned} \tag{5-10}$$

que son ecuaciones de diferencia. El análisis es extensible al caso de reacciones sucesivas de tipo continuo.

Lange continúa su propuesta estudiando el caso del equilibrio y la estabilidad de los sistemas así descritos. Demuestra que en este caso el sistema *debe tener por lo menos un acoplamiento en retroalimentación*, es decir, algún elemento activo que esté acoplado directa o indirectamente a otro elemento activo que recibe de él, como parte de sus entradas, algunas salidas (o todas), además de cumplir ciertas propiedades matemáticas que no son del caso discutir aquí. Lo indicado en cursiva es de extraordinaria importancia para comprender los sistemas complejos, como veremos en su momento.

Finalmente, Lange estudia las condiciones para que se dé la equifinalidad (ergodicidad es el término técnico utilizado en matemáticas). Para Lange, la existencia de procesos ergódicos de autoconducción del desarrollo de sistemas, explica los fenómenos que han originado las interpretaciones de tipo “vitalismo metafísico”. La estabilidad de un sistema y la ergodicidad de un proceso de desarrollo son el resultado del modo de acción de los elementos del sistema y de los acoplamientos de los elementos, es decir, de la estructura del sistema.

La concepción de un sistema como un conjunto de elementos activos cuyas interrelaciones son definibles mediante una matriz S y su comportamiento individual mediante una matriz de transformación T brinda un cuerpo teórico de una gran coherencia, en el cual es posible explicar y analizar la principales leyes sistémicas: jerarquización, centralización-descentralización, totalidad, mínima entropía, emergencia, complejidad etc. Además, permite una reconciliación entre los “todos” y las “partes”.

La gran limitante, para el caso de los estudios de sistemas humanos, es la misma que para el modelo de Bertalanffy: la dificultad de identificación de los elementos activos y sus respectivas mediciones exigidas para la definición de S y T . Por esta razón, se han desarrollado metodologías más que teorías, para enfrentar este tipo de sistemas, asunto que, como dijimos anteriormente, será analizado en detalle en los próximos capítulos. De todas maneras, Lange ha demostrado que sí es posible proponer un cuerpo teórico para el estudio y descripción de los sistemas en general⁷⁹.

79. El lector interesado en conocer más en detalle la propuesta de Lange puede remitirse al APÉNDICE literal A.5.3.

5.3.3 Jerarquización, casi-descomponibilidad

Antes de dar por terminada la visión cibernética de los sistemas propuesta por Lange, vale la pena destacar la forma en la que es posible utilizar estas ideas para explicar el concepto de evolución de los sistemas propuesto por H. Simon (1979).

Lange (*Op. Cit.*, p. 30-) hace referencia a los “sistemas de orden superior”: se trata de la jerarquización y emergencia en los sistemas.

Simon aclara que cuando dos sistemas S_1 y S_2 se acoplan, se crea un nuevo sistema, generándose una nueva matriz estructural S' definida como:

$$S' = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

S_{11} es la matriz estructural de S_1 definida por los acoples que se presentan en dicho sistema y S_{22} la matriz estructural correspondiente de S_2 . Por su parte, S_{12} es la matriz estructural de los acoplamientos entre elementos de S_1 con elementos de S_2 y S_{21} es la matriz estructural de los acoplamientos entre elementos de S_2 con elementos de S_1 . La idea se puede extender fácilmente a sistemas de orden mayor. Simon (*Op. Cit.* p. 127) define un sistema complejo como aquel sistema que está compuesto de un gran número de partes que actúan entre sí de una manera no sencilla; estos sistemas evolucionan mucho más rápidamente a partir de sistemas simples cuando existen unas formas intermedias estables, que cuando no se hallan éstas. Entre las formas complejas posibles, las jerarquías son las únicas que tienen tiempo de evolucionar.

Partiendo de este concepto de jerarquización, el profesor Simon define como “sistema jerárquico descomponible” aquel en el cual las interacciones inter-sistémicas son nulas. En términos de (5-11), el sistema es descomponible si $S_{12} = S_{21} = \mathbf{0}$ (matriz nula). Es evidente que esto no ocurre en la naturaleza, sino en forma ideal. En general lo que se encuentra es relaciones débiles entre algunas partes; son los sistemas cuasidescomponibles. El triunfo del reduccionismo ha estado cimentado en el descubrimiento de fenómenos en los cuales esta casi-descomponibilidad se cumple. La “exactitud” de una ley natural, dependerá en gran medida de hasta dónde las interacciones intersistémicas no sean importantes.

Podemos estudiar las jerarquías a partir de estos sistemas “cuasidescomponibles” en donde existen interacciones entre sistemas que son leves, pero no nulas. Si extendemos la definición dada en (5-11) para M sistemas acoplados, S' puede escribirse como se indica en la ecuación (5-12).

$$S' = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NM} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

Un sistema será cuasidescomponible si disponiendo de una medida de interacción entre sistemas, los valores encontrados en una relación de dos subsistemas son menores que los hallados en otras. La figura 5.11 da una idea de este concepto tanto para un sistema (figura de la izquierda) como para sistemas que se interrelacionan (figura de la derecha) definiendo un sistema de complejidad superior. En ambas figuras las líneas (o arcos) punteadas indican relaciones débiles con respecto a las líneas enteras.

Casi-descomponibilidad de los sistemas

Fig. 5.11

Como puede observarse, en S_1 se pueden reconocer dos subsistemas: uno formado por los sistemas (elementos) e_1 y e_4 , y otro formado por los elementos e_2 , e_3 , y e_5 . Para Σ , los sistemas (subsistemas) Σ_2 y Σ_3 forman un subsistema, y Σ_1 otro. Podríamos estudiar en forma separada cada uno de estos grupos, pero sin olvidar que existen interrelaciones que han sido suprimidas. Regenerar el sistema a partir de estas subdivisiones no es un

proceso sencillo. G. Klir lo llama el problema de la *reconstructabilidad del sistema* y es uno de los temas que desarrolla en su metodología denominada *General Systems Problem Solving* (GPSS) (1985).

Un ejemplo sencillo lo brinda la organización formal. Allí cada superior inmediato está “conectado” con un número reducido de subordinados y, a su vez, lo está con un superior inmediato. Desde luego, todos sabemos que existe una organización informal en donde aparecen otros canales de comunicación diferentes a los establecidos por las líneas de autoridad y responsabilidad. Pero aún así, la mayoría de estos canales conducen, de un individuo particular, a un número muy limitado de superiores suyos así como de subordinados y asociados. Ejemplos similares se presentan en la teoría del calor, dinámica económica y sistemas físico-químicos. Por ejemplo, las fuerzas intermoleculares, en las sustancias orgánicas, son generalmente más débiles que las fuerzas moleculares y éstas más débiles que las nucleares. En el caso del péndulo de Galileo la casi-descomponibilidad se da con el aislamiento. Sólo la influencia gravitacional de la tierra es tenida en cuenta; los demás planetas quedan excluidos. Para el caso de la familia, si se estudia sólo a ese grupo familiar, una opción (y no la más conveniente desde el punto de vista sistémico) es considerarla aislada de su entorno y analizarla sólo a través de sus interrelaciones internas. Otra casi-descomponibilidad podría ser el estudio de la familia relacionada con otras familias cercanas afectivamente. Es claro que llegará un momento en el cual no se integrarán más familias. Remitimos al lector al numeral 4.2 (reductibilidad sistémica).

¿Por qué se presenta esta casi-descomponibilidad? Como explica Simon, no es arriesgado postular que en la naturaleza, incluyendo en ella los seres humanos, las fuerzas de interacción obran sólo dentro de ciertos límites. Para el ejemplo en la administración, la capacidad de un individuo para interactuar simultáneamente con otros está limitada a un cierto número. Posiblemente, factores psicológicos, sociológicos o fisiológicos (o de otra índole) puedan explicar este hecho. Lo cierto es que es observable y no sólo para el ejemplo aquí citado. Miller (1968) ha sugerido que el ser humano puede manejar simultáneamente un número máximo de conceptos o variables que oscila entre 5 y 9 (7 ± 2). De alguna manera, esto viene a corroborar la conjetura antes expuesta.

La casi-descomponibilidad juega un papel importante para comprender los sistemas. Gracias a ella, muchos sistemas complejos que poseen estructuras jerárquicas cuasidescomponibles, pueden ser comprendidos y descritos. De

cierta forma, la casi-descomponibilidad es un regulador que reduce la variedad inicial del sistema.

Como dice Simon (1979, p. 155):

Si en el mundo hay importantes sistemas que son complejos sin ser jerárquicos, es posible que hasta cierto punto escapen a nuestra observación y comprensión. El análisis de su comportamiento supondría unos conocimientos y unos cálculos tan detallados de las interacciones de sus partes elementales, que puede afirmarse que, sin duda, están fuera del alcance de nuestra capacidad de recordar o de calcular.

De hecho Simon ha generado otra manera de clasificar los sistemas (Skyttner, p. 72):

- *Descomponibles*: aquellos en los cuales los subsistemas son independientes. Por ejemplo, un gas inerte en el cual las fuerzas intermoleculares son despreciables con respecto a las intramoleculares.
- *Casi descomponibles*: las interacciones entre los subsistemas son débiles pero no despreciables; las intercomponentes son más débiles que las intracomponentes. Las organizaciones son de este tipo.
- *No descomponibles*: dependen directamente de otros sistemas o los afectan explícitamente. Por ejemplo un pulmón artificial.

5.4 Resumen

Si la T.G.S. pretende ser científica, entonces debe tener una formalización a la manera en que se explica en el capítulo 2.

Una primera aproximación al tema nos llevó al concepto de clasificación como una herramienta conceptual fundamental para poder establecer una teoría que busque generalizar varias realidades contenidas en un ámbito común.

La clasificación de Boulding avanza en forma jerárquica en la complejidad de los “sistemas” estudiados, y destaca en cada nivel la propiedad emergente que lo diferencia de los anteriores.

Ackoff nos propone dos clasificaciones. Una, basada en el comportamiento del sistema, nos permite distinguir entre reacción, respuesta y acto, entre los

sistemas reactivos –los que mantienen un estado– y los responsivos –que buscan desde una a múltiples metas–; entre los sistemas intencionales –aquellos en los cuales un observador presume cierta intencionalidad (capacidad de decidir, voluntad)– y los intencionados, en los que claramente es el sistema el que demuestra tal característica. La otra, es una clasificación basada en la organización. Se distinguen los sistemas determinados, animados, sociales y ecológicos que forman una jerarquía en la cual la propiedad emergente está identificada por el concepto de intencionalidad o no intencionalidad del sistema.

Por su parte, Checkland nos brinda dos maneras de ver los sistemas: una, como un todo compuesto por subsistemas que pertenecen a los sistemas físicos diseñados, a los sistemas abstractos, a los de la actividad humana y a los naturales. También hay un lugar para los sistemas trascendentes; y otra, en la que los determina como “duros” y “blandos”. Los duros están relacionados con propósitos u objetivos claramente definidos, estructuras perfectamente delimitadas y procesos identificables. Los blandos, con objetivos difícilmente definibles, estructuras borrosas arduas de observar o delimitar, y procesos en conflictos que dificultan la comprensión de la situación observada.

Enseguida, desarrollamos con mayor profundidad el concepto de ley. Discutimos las leyes numéricas, aquellas que se basan en una propiedad que tiene relación de orden y, por lo tanto, tiene la opción de ser medida, en contraposición a propiedades que no tienen tal relación. De esta manera, se explica lo que puede ser medible y lo que no puede serlo. Tal discusión nos lleva a considerar la relación entre la matemática como lenguaje científico, y su carácter práctico, como elemento de cálculo y explicación.

Se presentan dos sistemas formales de muchos otros que existen para la T.G.S.: el de L. von Bertalanffy, basado en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, y el de O. Lange, quien utiliza el concepto de elemento activo y desarrolla su teoría a partir de la cibernética. Ambas propuestas cumplen con la finalidad de demostrar que es posible presentar un cuerpo coherente en lenguaje matemático debidamente formalizado. Sin embargo, ambos sistemas presentan una gran limitación para ser aplicados a diversas situaciones de los sistemas sociales, debido a la dificultad de representar matemáticamente sus relaciones y propiedades.

Cerramos este capítulo con la idea de H. Simon sobre la cuasidescomponibilidad. Ella nos permite aplicar el concepto de sistema, subsistema y ambiente sin mayor dificultad al demostrar que, aunque los elementos del universo

estén de una manera u otra interrelacionados, en relación con las situaciones prácticas tales interacciones pueden ser cortadas si se tiene en cuenta la fuerza con la que ellas se influyen; así se puede reducir el tamaño de los elementos a considerar sin afectar dicho sistema sensiblemente. Nos aclara que nunca deberemos llegar al sistema mínimo (la cuerda, que no es sistema) como tampoco al sistema máximo (el universo, que tampoco es sistema) cuando de estudiar un sistema concreto se trata.

CAPÍTULO 6

MATEMÁTICAS DE LA T.G.S.

6.0 Nuevos conceptos, nuevas matemáticas

Como se indicó anteriormente, la Teoría General de Sistemas tuvo un período de receso que afectó notablemente el impacto que venía ejerciendo en las diferentes ramas del conocimiento. Esto se debió fundamentalmente a la falta de herramientas adecuadas que permitieran representar, en un lenguaje matemático, muchas de las ideas y observaciones que se habían realizado y planteado como elementos fundamentales de esta teoría. La idea básica de Bertalanffy, al respecto, era el uso de sistemas de ecuaciones diferenciales. Se identificaron los patrones mas no su representación abstracta. El gran reto era la no linealidad de los sistemas complejos.

El concepto de sistema complejo ya había sido considerado por la matemática y la física y existían estudios sobre las redes neuronales desde un punto de vista matemático.

En la actualidad estos son algunos de los fenómenos que se consideran complejos:

- a) La teoría del caos: sistemas determinados, no predecibles (visión de la matemática).
- b) Las redes neuronales y sus modelos matemáticos.
- c) El estudio de los sistemas adaptativos, aquellos que aprenden y se adaptan a partir de su experiencia: los mercados de capitales, las hormigas, la biosfera y los ecosistemas, el cerebro, la célula, los sistemas sociales.
- d) Los sistemas no lineales. Aquellos que no cumplen el principio de superposición.

Se dice que una función $f(x)$ es lineal (cumple con el *principio de superposición*) si:

$$i) f(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_n)$$

$$ii) f(kx) = kf(x), k \text{ un escalar.}$$

En física, lo que se intenta es linealizar todos los sistemas que no lo son, ya que el análisis es más fácil cuando el principio de superposición se cumple.

La Termodinámica Irreversible, la Teoría de Conjuntos Difusos, la Teoría de Caos, la Teoría de fractales y la Teoría de Catástrofes son aspectos de las nuevas matemáticas de la complejidad. Aquí no se cumple este principio. En este capítulo y en los dos siguientes haremos referencia al respecto.

- e) Sistemas autoorganizados, que tiene que ver con los sistemas que no están en un equilibrio termodinámico.

Estos sistemas complejos exhiben ciertas características comunes:

- a) Desarrollan fallas en cascada. Como son sistemas altamente interactuados, una falla en un elemento puede transmitirse rápidamente a todo el sistema: si falla una parte, hay tendencia a que falle el sistema completo.
- b) Son sistemas abiertos alejados de estados de equilibrio de máxima entropía. Disipan energía y en este proceso, forman islas de orden.
- c) Poseen memoria (histéresis: la historia afecta los valores de los estados internos, como ocurre en una banda de caucho cuando se estira y luego se suelta).
- d) Son anidados (jerárquicos). Sus componentes (subsistemas) son también, en general, sistemas complejos.
- e) Ostentan Multiplicidad dinámica. Son sistemas densamente interconectados localmente y eventualmente conectados con elementos distantes, en forma aleatoria.
- f) Poseen la propiedad de la emergencia sistémica: el todo tiene propiedades o comportamientos que sus partes no poseen.
- g) Tienen lazos de retroalimentación positiva y negativa.

En el siguiente capítulo se hará referencia a varias teorías que analizan estas propiedades.

6.1 Termodinámica irreversible

Se entiende por termodinámica la parte de la física que estudia el calor y su transformación en energía mecánica.

La cifra que indica lo caliente o frío que está un cuerpo con relación a una norma se denomina *temperatura*. De esta definición podemos concluir que la temperatura es relativa a una escala de comparación⁸⁰. La temperatura es proporcional al movimiento promedio de traslación de las moléculas y no a su vibración o rotación⁸¹.

El *calor* es la energía transferida de un objeto a otro debida a una diferencia de temperatura. Los cuerpos no contienen calor. El calor es sólo energía en tránsito. Igual ocurre con el trabajo. Por lo tanto, uno y otro sólo pueden producirse. El calor se representa con la letra *Q* y el trabajo con la letra *W*.

Existen otros tipos de energía⁸², entre ellos la energía interna (o térmica) que es la energía total de todas las moléculas del objeto, es decir, el total de la energía cinética de traslación, rotación y vibración de las moléculas y de la energía potencial entre ellas. Se denomina generalmente con la letra *U*.

Para poder comprender bien los procesos termodinámicos es necesario definir lo que entendemos por *equilibrio termodinámico*. Un sistema está en equilibrio termodinámico cuando:

- El sistema se encuentra en un estado de equilibrio mecánico: la suma de las fuerzas, tanto internas como externas que actúan sobre él, es cero.
- El sistema está en equilibrio químico, es decir, no hay una tendencia a cambios espontáneos en la estructura química del sistema.
- El sistema está en equilibrio térmico, es decir, todas sus partes están a la misma temperatura, e igual a la temperatura ambiente si el sistema no es un sistema aislado.

La medición del estado de equilibrio termodinámico se especifica dando los valores de algunas pocas cantidades tales como temperatura, masa, presión y

80. Por ejemplo, la escala Celsius va de 0 (temperatura de la congelación del agua) a 100 (temperatura de ebullición del agua). La escala Fahrenheit le asigna el número 32 al punto de congelación del agua y 212 al punto de ebullición. Ambas escalas se subdividen en 100 partes y cada parte se denomina *grado Celsius* o *grado Fahrenheit* según el caso. La escala Kelvin asigna 0 a la mínima temperatura absoluta (-273 Celsius); en esta escala el hielo se funde a +273 K.

81. En general se habla de átomos y moléculas. Es común referirse a las moléculas sin detallar que también hay una referencia a los átomos.

82. Para conocer sobre los diferentes tipos de energía véase el APÉNDICE literal A.6.1.

densidad. Estas propiedades, junto con algunas otras (como tensión y composición), se denominan el *estado termodinámico del sistema*.

Cuando se inició el estudio teórico de las máquinas de vapor, se encontró que, en las máquinas construidas, todo el trabajo se podía convertir en calor, pero el calor no era convertible completamente en trabajo. Se pensó que tal situación se debía a la imperfección de los materiales (distribución de su peso, rigidez relativa, no homogeneidad de los materiales...), a la fricción entre las diferentes piezas, a la ineficiencia en el proceso de transmisión de calor... Pero los perfeccionamientos al respecto no arrojaron una mejora sensible.

Sadi Carnot realizó el estudio de una máquina teórica (otro gran constructo mental, al que ya debemos estar habituados) en el cual demostró que la eficiencia de una máquina térmica no podía ser jamás igual al 100%.

La máquina térmica funciona entre dos fuentes de calor, una a temperatura mayor que otra, y en la cual el calor fluye del recipiente de mayor temperatura al de menor temperatura. Durante este proceso, el calor transmitido entre las dos fuentes puede producir trabajo. Calor y trabajo son tipos de energía que se acumulan de forma diferente. El calor se mide en calorías y el trabajo en Joules. James Prescott Joules realizó los experimentos que permitieron establecer la siguiente relación: $1.0 W \text{ (joules)} = 4.18 Q \text{ (calorías)}$.

Esta parte del proceso tiene que ver con lo que se conoce como *conducción del calor*. Fue Jean Joseph Fourier quien estudió este fenómeno. Su ley dice: *el flujo de calor entre dos cuerpos es proporcional al gradiente de temperatura entre esos dos cuerpos*⁸³. Más concretamente:

$$\Delta Q \propto f(t, A, \Delta T / \Delta x)$$

en donde t es el tiempo transcurrido durante el proceso de conducción, A el área de la sección de una lámina de espesor Δx y ΔT la diferencia de temperatura entre las dos caras de dicha lámina. Como se deduce, dicha conducción no tiene que ver con la masa de los cuerpos, como sí ocurre en la ley de gravitación. Es un fenómeno que escapa a la visión newtoniana de explicación del universo: aparecen nuevas formas matemáticas de explicar nuevos fenómenos. Como hace notar Prigogine & Stengers (2004, p. 141-), se enfrentan nuevas propiedades a viejas ideas fuertemente establecidas: la gravitación obra sobre masas inertes que la sufren sin ser afectadas, salvo en su movimiento; el calor

83. El lector interesado puede remitirse al APÉNDICE, literal A.6.2.

transforma la materia, la modifica en sus propiedades intrínsecas. Al equilibrio dinámico newtoniano hay que agregar ahora otro equilibrio: el termodinámico, ya que la propagación del calor tiende a distribuir las temperaturas homogéneamente en los cuerpos donde se produce. Por otra parte, esta tendencia a la homogeneidad es de carácter irreversible, contrario a la idea de reversibilidad del universo newtoniano⁸⁴.

Consideremos ahora la máquina térmica. Para ello debemos referirnos al ciclo de Carnot.

En este ciclo el sistema (un gas ideal confinado en un cilindro con un émbolo, aislados del ambiente salvo en su parte inferior por la que se puede adquirir o transmitir calor), pasa por cuatro estados caracterizados por una presión (p), un volumen (V) y una temperatura (T) dados.

El trabajo realizado por el sistema es igual a la diferencia entre el calor Q_1 que le suministra el ambiente al sistema y el calor Q_2 que le cede el sistema al ambiente haciendo que el proceso sea reversible (izquierda figura 6.1). Para que esto se cumpla, el movimiento del émbolo debe ser muy lento⁸⁵.

El trabajo (W) realizado por el sistema se calcula, entonces, a partir de la expresión:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (6.1)$$

De acuerdo con lo anterior, el sistema ha convertido calor en trabajo. Al repetir el ciclo, se producirá más trabajo. Esto es lo que se conoce como una *máquina de calor* o *máquina térmica*.

En el mundo real, este proceso de conversión de calor en trabajo se realiza mediante diferentes tipos de gases tales como aire, combustibles y oxígeno. El calor se obtiene a partir de diversos tipos de combustibles como petróleo, gas e incluso energía atómica. Estas máquinas no operan bajo la condición de reversibilidad, pero la máquina ideal de Carnot nos permite comparar el comportamiento de las reales frente a una “máquina perfecta”.

Una máquina térmica perfecta convertiría todo el calor suministrado, Q en trabajo W (violando la segunda ley) y reconvertiría el trabajo en la misma canti-

84. Para conocer un poco más sobre el tema se sugiere ver el LITERAL A.6.3.

85. Para un estudio un poco más profundo sobre el tema, referirse al APÉNDICE, literal A.6.4.

dad Q realizando de nuevo un trabajo W , sin consumo adicional de energía. La figura 6.1 (imagen derecha) ilustra una máquina térmica real y una “perfecta”.

Máquina térmica

Fig. 6.1

La eficiencia e de una máquina de calor es la relación entre el trabajo producido y el calor suministrado por el recipiente de temperatura mayor:

Es posible demostrar que, para el mismo caso ideal:

$$(Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1 \quad (6.2)$$

Por lo tanto

$$e = 1 - T_2/T_1 \quad (6.3)$$

$$e = W/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1 \quad (6.4)$$

De acuerdo con estas ecuaciones, la eficiencia de una máquina térmica perfecta es del 100% si el calor cedido al medio (Q_2) es cero, o la temperatura del recipiente más frío (T_2) es cero grados Kelvin. La experiencia ha demostrado que, bajo ninguna circunstancia, durante el proceso de compresión Q_2 puede ser igual a 0. Siempre se cede calor al ambiente. Este calor cedido, no puede

realizar trabajo. Si se mira desde el lado de la temperatura, no es posible alcanzar el cero absoluto. Esto se conoce como la tercera ley de la termodinámica:

No existe un procedimiento, ni siquiera idealizado, que reduzca la temperatura de un sistema al valor del cero absoluto, en un número finito de operaciones.

A partir del ciclo de Carnot, es posible definir la relación $\Delta Q/T$: cantidad de calor cedida por un sistema con relación a su temperatura, en grados Kelvin. Esta relación recibe el nombre de *entropía* y mide la habilidad de un sistema para producir trabajo. En esta definición macroscópica no se tiene en cuenta el concepto de masa (materia). Hewitt (2004) lo expresa así:

En los procesos naturales la energía de alta calidad tiende a transformarse en energía de menor calidad; el orden tiende al desorden⁸⁶.

Por eso se dice que la entropía es una medida de la cantidad de desorden (energía degradada).

Que la entropía mide la habilidad que tiene un sistema para realizar trabajo, puede comprenderse a partir del siguiente experimento. Consideremos dos cuerpos totalmente aislados, de temperaturas diferentes, que se ponen en contacto (ver figura 6.2).

Transferencia de calor entre dos cuerpos a temperaturas diferentes

Fig. 6.2

⁸⁶.No se trata de una calidad energética de menor rango. Sólo que, siendo energía, no puede aprovecharse para realizar trabajo. En el numeral 6.1.3 se precisará el concepto de orden.

Ellos alcanzarán un estado de equilibrio térmico. Tampoco aquí existe pérdida de energía en el proceso debido a su aislamiento.

Sin embargo, el sistema como un todo ha perdido su capacidad de hacer trabajo. Antes de estar en contacto, se podía obtenerlo gracias a la diferencia de temperatura (máquina térmica). Al tener ambos la misma temperatura, el trabajo ya no puede obtenerse. La conducción de calor también es un proceso irreversible⁸⁷.

El balance de entropía de este sistema cerrado es fácil de calcular. La entropía cedida por el cuerpo de temperatura mayor es, por definición, $S_a = -\Delta Q/T_a$. La entropía recibida por el otro cuerpo será $S_b = +\Delta Q/T_b$. Como $T_a > T_b$ entonces, $S_a < S_b$. En un sistema cerrado, la entropía sólo puede crecer.

Es posible encontrar procesos irreversibles que no están en equilibrio pero que aún se les puede especificar propiedades termodinámicas relativas a los estados de equilibrio. Estos procesos están caracterizados por propiedades que no varían con el tiempo, sino en el espacio, punto por punto en el sistema. De tales procesos se dice que están en un *estado estable*. Un ejemplo sencillo es considerar una barra de metal, por ejemplo cobre, perfectamente aislada la cual se conecta entre dos recipientes que difieren en una cantidad finita de temperatura (esto le da el carácter de irreversibilidad al proceso)⁸⁸. La figura 6.3 ilustra el caso.

La entropía que sale, que corresponde a la temperatura más alta en el extremo izquierdo de la barra, es $S_a = \Delta Q/T_a$ mientras la que entra por el extremo derecho es $S_b = \Delta Q/T_b$. Evidentemente $S_a < S_b$; la entropía crece, como lo indica la segunda ley de la termodinámica. Por su parte, la temperatura en cada punto de la barra, cuando el sistema alcanza un estado estable, no cambia con el tiempo. Sin embargo, sí cambia a lo largo de la barra como lo muestra la gráfica de la misma figura.

La barra de cobre puede considerarse como un sistema abierto que posee un estado estable alejado de la posición de equilibrio (temperatura igual en toda la barra). Sin importar la temperatura con la cual se inicie el proceso, el estado estable se alcanza invariablemente, siendo pues un estado equifinal.

87. Otro análisis complementario puede verse en el APÉNDICE literal A.6.5.

88. Los recipientes calóricos mantienen la misma temperatura en todo momento, independientemente si están cediendo o recibiendo calor. *Cfr.* de nuevo el APÉNDICE, literal A.6.2.

Fig. 6.3

Incidentalmente, estas son las características que identifican a muchos organismos y a los seres vivos como sistemas abiertos.

No obstante, hay diferencias importantes entre el proceso aquí descrito y los seres vivos. Una de ellas es que, en el caso de la barra, el estado equifinal *debe* alcanzarse; en los sistemas abiertos, *puede* alcanzarse. Otra diferencia importante la analizaremos enseguida.

Si consideramos la entropía como una cantidad que “fluye” a través de la barra conductora, entonces tendremos que sale menos entropía de la parte izquierda de la barra que la que entra en la parte derecha de la misma. El aumento de entropía puede pensarse como generada en el conductor. Todos los flujos de estados estables, irreversibles, incluyen el valor ΔS_{irrev} , que es positivo, término que se denomina *tasa de generación de entropía*. Se observa, pues, un aumento de entropía. Pero en los organismos vivos, en los cuales el proceso es irreversible, el sistema tiende a *disminuir* la entropía. Esto se logra mediante la importación de *neguentropía* (entropía negativa). Prigogine explica esto mediante la función expandida de la entropía. En los sistemas abiertos, el cambio total de entropía puede escribirse:

$$\Delta S_{Tot} = \Delta S_i + \Delta S_e \quad (6-5)$$

en donde ΔS_i es la producción de entropía debida a los procesos irreversibles en el sistema, tales como reacciones químicas, difusión, transferencia de calor, etc., y ΔS_e es el cambio en la entropía que se importa. ΔS_i es siempre positiva, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, ΔS_e , la entropía que se transfiere, puede ser positiva o negativa; esta última se logra mediante la importación de materia que lleva energía libre. En muchos casos, la entropía negativa es la información recibida por el sistema.

Como ya hemos dicho, en un sistema aislado la entropía crece, pero cuando el sistema interactúa con su medio, y esto es lo general en los procesos cotidianos, es difícil medir el cambio total en la entropía. Por esta razón, es importante tener en consideración la energía libre.

La *energía libre de Gibbs* permite conocer cuándo, en un sistema abierto formado por una reacción química, ésta tiene una tendencia espontánea hacia un aumento de entropía bajo condiciones de presión y temperatura constantes. Como se sabe, (ecuación 6.5 aplicada al universo) $\Delta S_{univ} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{ambiente}$. En general, es difícil calcular el cambio de entropía en el ambiente. Gibbs propuso una manera de saber si en estas condiciones la reacción es espontánea, utilizando únicamente variables del sistema.

Llamaremos ΔG a la energía química que queda libre para realizar trabajo. Esta puede definirse mediante la relación⁸⁹:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6-6)$$

Con esta expresión, a temperatura y presión constantes es posible establecer las siguientes relaciones para decidir si un proceso es espontáneo o no:

- Si $\Delta G < 0$ el proceso es espontáneo.
- Si $\Delta G = 0$ el sistema está en equilibrio.
- Si $\Delta G > 0$ el proceso no es espontáneo.

Terminemos este numeral citando a Prigogine & Stengers (2004, p. 160):

¡Cuán extraño es este lenguaje [el de la termodinámica] al de la dinámica! Allí, el sistema evoluciona sobre una trayectoria dada de una vez por todas, y guarda eterno recuerdo de su punto de partida (ya que las condiciones iniciales determinan de una vez por todas la trayectoria). Aquí, por el

89. H es la entalpía del sistema y se refiere a la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. Matemáticamente: $H = U + pV$.

contrario, *todos* los sistemas en estado de no-equilibrio evolucionan hacia el *mismo* estado de equilibrio, habiendo *olvidado* el sistema sus condiciones iniciales, habiendo olvidado la forma en que había sido preparado.

6.1.1 Estructuras disipativas

Prigogine desarrolló la teoría de las estructuras *disipativas*⁹⁰ con el fin de explicar los fenómenos termodinámicos alejados de los estados de equilibrio. De acuerdo con esta teoría, es posible encontrar estados de orden sin contradecir la segunda ley de la termodinámica. La entropía total del sistema sigue aumentando, pero esto no implica que no se puedan crear “islas” ordenadas. La probabilidad de que surjan estas estructuras al azar es prácticamente nula. El orden y el desorden son procesos que se dan simultáneamente, alimentándose entre sí. Como afirma Capra (1999, p. 202):

Esta nueva percepción de orden y desorden representa una inversión de las visiones científicas tradicionales. En la perspectiva clásica, para la que la física es la principal fuente de conceptos y metáforas, se asocia orden con equilibrio –como, por ejemplo, en cristales y otras estructuras estáticas–, mientras que el desorden se identifica con situaciones de no-equilibrio tales como turbulencias. En la nueva ciencia de la complejidad –que se inspira en la trama de la vida– aprendemos que el no equilibrio es una fuente de orden. Los flujos turbulentos de aire y agua, si bien aparentemente caóticos, están en realidad altamente organizados, exhibiendo complejos patrones de vórtices dividiéndose y subdividiéndose una y otra vez a escalas cada vez menores. En los sistemas vivos, el orden emergente del no-equilibrio resulta mucho más evidente, manifestándose en la riqueza, diversidad y belleza del mundo que nos rodea. A través del mundo viviente, el caos es transformado en orden.

Las estructuras disipativas se ocupan, por lo tanto, de la descripción de los sistemas autoorganizados. La matemática necesaria para explicar estas estructuras es del tipo no lineal, que permite analizar los sistemas lejos de su estado de equilibrio. Los estudios iniciales partieron de lo que se conocía entonces como la *inestabilidad de Bénard*. Este es un fenómeno que se presenta por

90. Se dice que un sistema es disipativo si su energía se degrada en forma de calor que, en parte, no es transformable en otras formas de energía menos degradada. Cumple, pues, con el segundo principio de la termodinámica.

convección térmica cuando una fina capa de un líquido es colocada entre dos láminas, y la inferior comienza a calentarse poco a poco. El flujo de calor que se genera se transmite por conducción hacia arriba. Las moléculas inferiores del fluido aumentan de volumen por lo que su densidad decrece, haciendo que estas tiendan a ascender, mientras que las más frías tienden a descender. Pero la viscosidad de líquido opone resistencia a tal dinámica. Sólo cuando la temperatura llega a un valor dado, este equilibrio se rompe y empiezan a aparecer patrones de células hexagonales, en las cuales el líquido caliente asciende por el centro de las mismas y el más frío desciende por sus paredes, pero la dirección del flujo no puede ser conocida de antemano. Se forman celdas en las cuales el flujo de uno de sus lados unas veces gira hacia la izquierda y el de la vecina hacia la derecha y en otras ocasiones lo hacen en forma contraria. El sistema se autoorganiza. La figura 6.4 muestra el fenómeno⁹¹. Situaciones similares se presentan cuando se coloca arena en una superficie plana y se hace mover la superficie hacia arriba y hacia abajo siguiendo una línea vertical. De nuevo una lucha entre fuerzas que tiende a formar patrones y otras a destruirlos. Aparece, de la nada, un patrón de orden.

Inestabilidad de Bénard: patrones hexagonales

Fig. 6.4

Capra (*Op. Cit.* p. 105) cita otro ejemplo interesante de los llamados *relojes químicos*, que también caen en el grupo de los sistemas autoorganizados. Estos “relojes químicos” retan la idea tradicional de la tendencia al orden en las reacciones químicas. La mezcla de cientos de millones de moléculas en una

⁹¹. Imágen obtenida de: <http://www.bing.com/images/search?q=inestabilidad+de+B%C3%A9nard&FORM=BIFD>

reacción, sugiere que, a la larga, éstas tienden a estados de equilibrio. Esto se explica mediante la estadística, y la teoría fue desarrollada por Boltzman. Pero los relojes químicos obedecen a reacciones químicas no lineales. Pasado un punto crítico, el sistema se comporta de manera inesperada. Consideremos, sólo como ejemplo, dos tipos de moléculas: blancas y negras. Una vez empezada su mezcla, el sistema total tenderá hacia un color gris, como era de esperarse. Sin embargo, a partir de cierto momento tomará alternativamente un color blanco y luego uno negro⁹².

Citando a A. Toffler (1984, Prigogine & Stengers, p.xv):

En términos Prigogianos, todos los sistemas contienen subsistemas que fluctúan continuamente. En ocasiones, resultado de una retroalimentación positiva, una única fluctuación o una combinación de ellas llega a ser tan poderosa que destroza la organización preexistente. En este momento revolucionario – que el autor lo denomina un "momento singular" o "un punto de bifurcación" – es intrínsecamente imposible determinar, de antemano, cuál será la dirección del cambio: si el sistema se desintegrará en un "caos" o saltará a un nuevo nivel de orden u organización superior que él llama una "estructura disipativa". (Tales estructuras físicas o químicas se determinan disipativas ya que al compararlas con las estructuras sencillas que reemplaza, requieren más energía para mantenerlas).

En esta nueva visión del mundo, la conclusión general es que la disipación es una fuente de orden, a pesar de ser sistemas sometidos a la segunda ley de la termodinámica. Es importante anotar que todos estos fenómenos surgen debido a la existencia de energía externa al sistema, que suministra la neguentropía necesaria para que se den los estados ordenados.

6.1.2 Entropía y teoría cuántica

Cuando la termodinámica se estudia desde el punto de vista de la teoría atómica se llega a interesantes conclusiones.

Ante todo, definamos lo que se conoce como un *estado cuántico*. En la concepción moderna de la naturaleza del mundo, tanto la materia como la energía se

92. Un interesante seguimiento a las ideas de los sistemas químicos que alternan sus estados de equilibrio (ruptura de simetría) la trae John Gribbin (*Así de simple*), pg. 184-.

consideran discretas. Es fácil comprender el caso de la materia ya que sabemos que está compuesta de átomos o moléculas. Con la energía, el concepto es más difícil de aceptar. Según esta visión, la energía de los átomos y de las moléculas se origina en la energía cinética de traslación (para partículas monoatómicas), mas la energía vibracional y la rotacional (para partículas diatómicas). La energía macroscópica de un sistema es igual a la suma de las energías de todas sus partículas elementales sean átomos o moléculas.

La figura 6.5 nos muestra cómo es posible que un mismo nivel energético, tenga diferentes estados cuánticos que lo satisfacen. Se consideran 4 partículas idénticas con una energía total de 6 unidades energéticas. Cada “escalón” es un nivel energético claramente delimitado. En otras palabras la partícula no puede estar en un estado intermedio: o está en un escalón o no lo está.

Estados cuánticos de multipartículas:

- a) $(0,1,2,3)$
- b) $(0,2,2,2)$

Mismo nivel de energía
Diversos estados cuánticos

Fig. 6.5

Indicaremos otros estados cuánticos con el mismo nivel:

$$0,2,2,0: 0 \times 0 + 2 \times 1 + 2 \times 2 + 0 \times 3 = 6$$

$$0,3,0,1 \quad 0 \times 0 + 3 \times 1 + 0 \times 2 + 1 \times 3 = 6$$

$$4,0,0,2 \quad 2 \times 0 + 0 \times 1 + 0 \times 2 + 2 \times 3 = 6$$

Si el sistema puede fluctuar, es decir, adquirir niveles energéticos diferentes a 6 (por ejemplo en un rango de 0 a 8 unidades de energía) tendríamos muchas posibilidades más.

Con base en el enfoque de niveles energéticos de la materia, la entropía puede ser definida de la manera siguiente:

$$S = -k \sum_L p_L \ln p_L \quad (6-7)$$

en donde p_L representa la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado cuántico particular, L , haciéndose la sumatoria sobre todos los estados cuánticos posibles. Por su parte, k es una constante de cambio de unidades cuyo valor es $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$. Un buen texto al respecto es Sussman (1972, cap. 5).

6.1.3 Información y entropía

La Teoría de la Información, propuesta por Shannon y Weaver (1949) estudia la cantidad de información contenida en un mensaje independientemente de su sintaxis, su semántica o cualquier otra característica que el término “información” pueda sugerir.

Un mensaje es una sucesión de símbolos. Debe existir un acuerdo sobre los símbolos entre quien los envía y quien los recibe. Pueden elaborarse mensajes mediante la combinación de mensajes previos. Consideraremos como concepto de “información” *la medida de nuestra libertad para escoger un mensaje*. Si cada mensaje tiene la misma probabilidad de ser seleccionado, la cantidad de información de n mensajes será, pues, n . Si iniciamos un mensaje con la letra p , la siguiente letra puede ser cada una de las cinco vocales y las consonantes l , r y s para una palabra en español: tenemos una “libertad” de ocho opciones para elegir. Si, en cambio, iniciamos con la letra q , la única letra posible que le sigue debe ser la u (en el caso del idioma español); no tenemos ninguna opción. La letra p tiene más información que la letra q ⁹³.

¿Cómo opera la medición anterior cuando se combinan mensajes? Consideremos la clave Morse, que consta de dos mensajes básicos: • (punto) y – (raya).

93. En este ejemplo, para facilitar el análisis hemos supuesto que tiene importancia el sentido de la palabra a enviar.

Supongamos ahora que obtenemos un nuevo mensaje mediante la combinación de tres de estos símbolos. Se obtendrán ocho mensajes como se indica en la figura 6.6.

Dos mensajes básicos combinados:
ocho mensajes posibles

Fig. 6.6

La información de este mensaje es de $8 = 2^3$: el contenido de información de los mensajes básicos • y — es dos, considerando cada uno por aparte; un mensaje que combine a ambos, tendrá cuatro unidades y el de la combinación de tres, ocho unidades.

El lector podría preguntarse si, desde alguna perspectiva, el significado de un mensaje tiene alguna importancia. Recordando lo discutido en el numeral 2.2, a nivel sintáctico (relación signo-signo), el nivel de los datos, es de lo que se ocupa la teoría de la información aquí descrita. El nivel semántico (signo-designatum), el nivel de información, es el nivel del significado de los símbolos y el nivel pragmático (relación signo-intérprete), el nivel de conocimiento, se ocupa del impacto personal y psicológico de la comunicación (Skyttner, p. 219-).

En lugar de potencias, podríamos pensar en el uso de logaritmos para realizar sólo sumas. De acuerdo con nuestra definición, si se toma el logaritmo en base dos de cada mensaje, entonces el contenido de información de los tres mensajes será: $\log_2 2^3 = 3$. Esta medida de la información tiene un significado práctico. ¿Cuál es el máximo número de preguntas del tipo “sí” o “no” necesario para acertar un mensaje dado de los indicados en la figura 6.6? Recordemos que la información es la libertad de escogencia de un mensaje. Si se pregunta por cada mensaje a la vez, el total máximo de preguntas será siete, para nuestro ejemplo (si la séptima es, se termina el interrogatorio; si no, deberá ser la octava opción, que no será necesario usarla). Pero es más eficiente dividir el grupo en dos partes iguales y preguntar si el mensaje particular está en el primer o segundo grupo. El nuevo grupo será de sólo cuatro mensajes. De nuevo dividimos en

dos partes iguales a este grupo y hacemos la misma pregunta. Queda ahora reducido a sólo dos elementos. La tercera pregunta acertará el mensaje escogido. Esto justifica la escogencia del $\log_2 n$. como medida de la información. En otras palabras, con máximo tres preguntas sabremos cuál es el mensaje escogido.

En resumen: la consideración de un punto o una raya aislados, tendrán como unidad de información $\log_2 2 = 1$ unidad de información. Esta unidad se llama “bit” (binary unit: unidad binaria). Si un mensaje es la combinación simultánea de dos de estos símbolos, la medida de la información de dicho mensaje será $\log_2 2^2 = 2$ bits (que es la suma de 1+1) y así sucesivamente.

Pero, ¿qué ocurriría si en un mensaje dado la libertad de escoger no es equiprobable? Supongamos que la probabilidad de que se presente un punto sea de 4/5; por lo tanto, la probabilidad de una raya será 1/5. De acuerdo con nuestra definición, la cantidad de información aportada por un punto será $\log_2(0.8)$ bits y la de una raya $\log_2(0.2)$ bits. Si ponderamos cada uno de estos valores con su respectiva probabilidad, la información total en este caso será:

$$-(0.8 \log_2(0.8) + 0.2 \log_2(0.2)) = 0.722 \text{ bits.}$$

El signo negativo se adiciona para hacer positivo el resultado (los logaritmos de numero menores que la unidad son negativos).

Shannon y Weaver proponen como medida de la cantidad de información de mensajes múltiples (más de dos mensajes) la expresión:

$$H = -\sum_j p_j \log_2 p_j, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6-8)$$

Para los casos equiprobables, es decir donde las probabilidades de ocurrencia de un mensaje cualquiera es la misma que la de cualquier otro, la expresión (6-8) toma su máximo valor. El lector puede comparar el resultado 0.722 con el valor de $-(1/3 \log_2 1/3 + 1/3 \log_2 1/3 + 1/3 \log_2 1/3)$ y observará que este resultado es mayor⁹⁴.

¿Y qué significa que los mensajes tengan la misma probabilidad de ocurrencia? Simplemente, que no tenemos ninguna información que favorezca más a uno que a otro, es decir, que nuestra ignorancia es máxima: el máximo contenido de información, la mayor novedad, se obtiene cuando los mensajes son equi-

94. La demostración matemática se encuentra en el APÉNDICE literal A.6.6.

probables. Si, por ejemplo, sabemos que un mensaje determinado va a ocurrir, entonces su probabilidad será de uno y la del resto de los mensajes será cero. El valor de la expresión (6-8) será entonces: $\log_2 1 = 0$; el mensaje no aporta ninguna información, no tenemos que decidir.

Observemos la extraordinaria similitud (obviamente un isomorfismo) entre la ecuación (6-8) y la ecuación (6-7). En la visión macroscópica de la entropía se tiene en cuenta la forma en que el cuerpo cede o recibe calor. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, S mide el conocimiento que tenemos de los estados cuánticos de un sistema. Cuando este conocimiento es mínimo, es decir cuando los estados cuánticos son equiprobables, el valor de S es máximo, indicando nuestra total ignorancia del sistema. Por esta razón, se dice que la entropía mide el grado de desorden de un sistema, es decir, el grado de ignorancia que tenemos respecto de él. Entre más conozcamos la distribución cuántica de un sistema, reconocemos más orden en el sistema y menos será la entropía del mismo.

Amplíemos un poco lo dicho. Consideremos un gas compuesto por cuatro moléculas que se mueven al azar, el cual se encuentra confinado en la parte izquierda de un recipiente que posee dos compartimientos, I y II comunicados por una trampa que puede estar cerrada o abierta según el caso. Cuando la trampa se abra, las partículas empezarán a pasar de un compartimiento a otro. Analicemos tres casos posibles indicados en la figura 6.7 como (a), (b) y (c).

Algunas posibilidades de cuatro moléculas al azar confinadas en un recipiente doble

Fig. 6.7

Supongamos que podamos identificar cada partícula (etiquetarlas de 1 a 4). En el caso (a), la probabilidad de que cualquier partícula esté en el compartimen-

to I es de 1: tenemos la certeza de que allí se encuentran todas las partículas. Escribiremos, pues, $p_{ii} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, 4$. La probabilidad de que estén en el compartimiento II , es 0: $p_{iii} = 0, \forall i = 1, 2, \dots, 4$. Por lo tanto, la entropía, de acuerdo con la ecuación (6-8) será:

$$S(a) = -(4/4 \ln 4/4) = 0$$

Para el caso dos tendremos, suponiendo por simplicidad que las partículas etiquetadas 1, 2 y 3 estén en I y la 4 en II :

$$S(b) = -(3/4 \ln 3/4 + 1/4 \ln 1/4) = 0.562 > 0.$$

La suposición anterior no afecta el resultado si las partículas del compartimiento de la izquierda hubieran sido la 1, 3 y la 4 por ejemplo, y la 2 estuviera en el compartimiento de la derecha.

Por razones similares $S(c)$ será:

$$S(c) = -(2/4 \ln 2/4 + 2/4 \ln 2/4) = 0.693 > 0.$$

En cada caso, la entropía ha ido aumentando.

Para cuatro elementos, el total de estados posibles es de 16. La tabla de la figura 6.8 los detalla.

I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1,2,3,4		1,2,3	4	1,2	3,4	4	1,2,3		1,2,3,4
		1,2,4	3	1,3	2,4	3	1,2,4		
		1,3,4	2	1,4	2,3	2	1,3,4		
		2,3,4	1	2,3	1,4	1	2,3,4		
				2,4	1,3				
				3,4	1,2				
1		4		6		4		1	
0		0.5624		0.6931		0.5624		1	

Estados posibles de cuatro elementos distribuibles en dos compartimentos y su entropía

Fig. 6.8

En el penúltimo renglón aparecen el total de estados posibles, en cada caso (por ejemplo, tres partículas en *I* y una en *II*: cuatro casos); en el último, el valor de la entropía de cada uno de estos estados posibles. Obsérvese que el valor máximo de la entropía se encuentra cuando las probabilidades de todos los estados posibles (6 estados) es la misma: $p_I = p_{II} = 1/2$. Si consideramos los valores de entropía más cercanos (0,5624 y 0,6931), 14 de los 16 estados, es decir un 87.5% corresponden a casos aproximadamente equiprobables. El ejemplo podría ahora considerar este mismo número de moléculas confinadas en un recipiente con tres compartimientos en lugar de dos. El análisis nos daría resultados similares.

A medida que el número de moléculas⁹⁵ (y de compartimientos) crezca, la tendencia normal de un estado con movimiento aleatorio es hacia estados de equiprobabilidad, es decir, de máxima entropía, en otras palabras, de mayor ignorancia, y como consecuencia de mayor *desorden*. Si asimilamos las partículas a átomos de oxígeno, podríamos pensar en la opción de que, fruto del azar, estos átomos se confinaran en un rincón superior del cuarto donde estamos y, por lo tanto, moriríamos asfixiados. De acuerdo con lo anterior, esto es probable. Sólo que la probabilidad es tan pequeña, que se necesitaría disponer de un tiempo inmensamente superior al que hasta ahora se ha consumido en la formación del universo actual para que tal fenómeno ocurriera. Por el contrario, el que todos los átomos estén mezclados, tiene una probabilidad cercana a 1. ¡Aquí el desorden es bienvenido!

El concepto de desorden, es pues, uno de cantidad de información y no un sentido estético del mismo. Fue Ludwig Boltzmann quien dio esta explicación de irreversibilidad, dentro del panorama clásico de la física. Se pasó de las trayectorias, necesarias para la descripción de la mecánica, hacia las probabilidades. Remitimos al lector al APÉNDICE numeral A.6.7.

6.2 Teoría de conjuntos difusos

En 1965 Lofti Zadeh publicó un artículo que introducía los conceptos básicos de un nuevo tipo de conjuntos los cuales denominó conjuntos difusos. La teoría matemática tradicional de los conjuntos (conjuntos clásicos, nítidos o “crisp sets” en la nomenclatura Anglosajona) parte de un concepto intuitivo de

95. Se sabe que el número de moléculas contenidas en un cm^3 de un gas es de 26×10^{17} .

“conjunto”: un grupo de elementos relacionados por una o varias características comunes. Podemos definir, por ejemplo, el conjunto formado por los padres de familia de los estudiantes de nuestra universidad, o el conjunto de los números enteros pares. Estos conjuntos nítidos se definen, bien sea enumerando sus elementos o bien describiendo las propiedades que los distinguen. Para nuestros dos ejemplos, escribiremos:

$$A = \{\text{Padres de los estudiantes de nuestra universidad.}\}$$

$$B = \{\text{Números enteros pares}\}, \text{ o } B = \{2, 4, 6, \dots\}, \text{ o } B = \{x/x \in \text{números pares} > 0\}^{96}.$$

Una propiedad de los conjuntos nítidos es aquella que identifica un elemento como perteneciente o no perteneciente a él. Así, para el conjunto A , un profesor de la universidad o es padre de familia de un alumno o no lo es. Para el conjunto B , “3”, al no ser un número par, no pertenece al conjunto B .

La dicotomía “perteneciente o no pertenece” es el fundamento de la lógica bivalente: una proposición o es verdadera o es falsa; no hay otra alternativa.

En el estudio de la complejidad, la matemática clásica se vio complementada con la teoría de conjuntos y la teoría de probabilidades. Sin embargo, muchos sistemas no pueden ser descritos matemáticamente en forma conveniente con ninguna de estas teorías. En ellos se presenta una gran dificultad al intentar medir los parámetros que definen los elementos del sistema y sus relaciones; se plantea una especie de *principio de incompatibilidad*: una gran precisión es incompatible con una gran complejidad.

La teoría que vamos a esbozar pretende acercar el análisis matemático a los sistemas complejos dejando de lado la precisión y el rigor, útiles cuando de sistemas muy estructurados se trata, a cambio de una mejor aproximación a la naturaleza del sistema.

Definamos lo que se entiende por conjunto difuso. Recordemos que un conjunto nítido es aquel en el cual sus elementos son reconocidos sin ninguna duda. Por ejemplo, el conjunto: $C = \{\text{tiza, tablero, apuntes}\}$ permite asegurar que la tiza es uno de sus elementos, mientras que una silla, no lo es. Proponemos ahora otro conjunto nítido: $X = \{\text{todos los elementos necesarios para}$

96. Recordemos que “ $x \in$ ” se lee: “ x pertenece a” y su contrario es “ $\notin$ ” que se lee: “no pertenece a”.

dictar una clase}. Evidentemente, C es una parte de X . Decimos que C es un subconjunto de X ($C \subset X$).

En este contexto, si pensamos en C como “el conjunto formado por algunos elementos necesarios para dictar una clase”, entonces el elemento “silla” podría ser incluido en C . La idea de poder formar parte de un conjunto con cierto “grado de pertenencia”, es el eje central de los conjuntos difusos. C es ahora, un conjunto difuso.

Un conjunto difuso es un conjunto en el cual la pertenencia o no de un elemento, tiene un valor entre 0 y 1. Entre más próximo esté el grado de pertenencia al valor 1, más pertenecerá el elemento al conjunto difuso. Si X es el conjunto universal de referencia, y A es un subconjunto de X , tendremos que un conjunto difuso A , se define como el par:

$$A = \{(x, m_A(x)), x \in X\} \quad (6-9)$$

$m_A(x) = k$ significa: x pertenece al conjunto difuso A con un grado de pertenencia k . Por ejemplo, si la silla tiene cierta importancia para formar parte de todos los elementos necesarios para dictar una clase (conjunto X), podemos decir que su grado de pertenencia es 0.8^{97} . De esta manera queda definido un nuevo conjunto C , difuso, del cual la silla forma parte con un grado de pertenencia de 0.8 : $m_C(\text{silla}) = 0.8$.

Para los conjuntos nítidos (*ssi*” significa “*si y sólo si*”):

$$m_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{ssi } x \in A \\ 0, & \text{ssi } x \notin A \end{cases} \quad (6-10)$$

El conjunto universal X es un conjunto nítido. Todo conjunto difuso debe ser un subconjunto de X .

Un ejemplo clásico es el de Zadeh relacionado con el concepto de “juventud”. Este es uno que pertenece a los conjuntos difusos. Es evidente que “juventud” es un concepto relativo (¡no es nítido!). Podríamos decir que una persona de 20 años o menos, es, sin duda, una persona joven; sin embargo, a medida

97. ¿Por qué 0.8? Podríamos pensar que se puede recibir una clase de pies, aunque sería incómodo. ¿Pero se podría sin profesor? Si la respuesta es no, entonces el profesor tendrá un grado de pertenencia igual a 1.0.

que su edad se aleje de 20 años, será considerada cada vez menos joven. Si se preguntara a diferentes personas, podríamos establecer la gráfica de la figura 6.9 como medida de la “función de pertenencia” de una persona al conjunto J , “personas jóvenes”.

Función de pertenencia del conjunto “joven”

Fig. 6.9

En este ejemplo, $X=[0, 100]$ representa el total de años a considerar. Es obvio que la gráfica dependerá de las personas entrevistadas. De acuerdo con esta gráfica una persona de 30 años pertenece al conjunto J con un grado de pertenencia de 0.9.

Escribiremos, entonces:

$$m_j(x = 30) = 0.9$$

Sin embargo, es necesario hacer la siguiente aclaración. En ningún momento esta expresión puede ser interpretada como si una persona de 30 años *tuviera una probabilidad de 0.9* de pertenecer al conjunto J . La función de pertenencia no cumple con los axiomas requeridos por la teoría de probabilidades⁹⁸.

98. La teoría de probabilidades se sustenta en las siguientes consideraciones: sea U un espacio muestral, $U = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Sea $p(e_i)$ la probabilidad asociada a un evento de U . Para que $p(e_i)$ sea una *distribución de probabilidad* deben cumplirse las siguientes condiciones (postulados de la teoría de probabilidades):

$$e_i, 0 \leq p(e_i) \leq 1.$$

$$\sum p(e_i) = 1, i=1, 2, \dots, n.$$

$$\text{Si } A = e_1 \cup e_2 \cup \dots \cup e_s, \text{ entonces } p(A) = \sum p(e_i) = 1, i = 1, 2, \dots, s.$$

$$p(\emptyset) = 0.$$

Sólo el primer postulado, y el cuarto, se cumplen en los conjuntos difusos, cambiando $p(e_i)$ por $m_A(x)$.

Consideremos ahora el conjunto difuso: $V=\{x/x \text{ es viejo}\}$. De nuevo, una persona de 20 años en ningún momento puede considerarse vieja, por lo que su grado de pertenencia al conjunto V , es sin duda de valor 0.

La figura 6.10 es una posible representación de la función de pertenencia del conjunto V .

Función de pertenencia del conjunto "Viejo"

Fig. 6.10

Según esta gráfica, una persona de 60 años tiene un grado de pertenencia de 0.10 con respecto al grupo de las personas viejas :

$$m_V(x = 60) = 0.10$$

La tabla de la página siguiente muestra los diferentes valores de los conjuntos anteriores, para tener mayor claridad al respecto.

Se ha incluido, en la segunda columna, el complemento, $\hat{J}$, del conjunto difuso J , el cual se definirá posteriormente.

Para aplicar estos conceptos es posible definir una serie de operaciones tales como la igualdad, la unión, la intersección, el complemento etc., entre conjuntos difusos.

¿Cuándo dos conjuntos difusos son iguales?

Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si:

$$\forall x \in X, m_A(x) = m_B(x). \quad (6-11)$$

<i>Edad</i>	$m_j(x)$	$m_f(x)$	$m_v(x)$
0	1	0	0
10	1	0	0
20	1	0	0
30	0,9	0,1	0,1
40	0,7	0,3	0,4
50	0,4	0,6	0,7
60	0,2	0,8	0,9
70	0,05	0,95	0,98
80	0,01	0,99	1
90	0	1	1
100	0	1	1

Con respecto a la lógica difusa podemos dar algunas ideas generales. En la lógica tradicional, al pertenecer o no un elemento a un conjunto, se reconoce la conocida *ley del tercero excluido*. Esto quiere decir que si A es un conjunto nítido, $\bar{A}$ su complemento,⁹⁹ y U el conjunto universal, entonces la unión de A con su complemento dará el conjunto U y la intersección de A con su complemento dará el conjunto vacío (ver figura 6.11).

Ley del tercero excluido

Fig. 6.11

Esto no es cierto para el caso de los conjuntos difusos. En estos conjuntos *un elemento puede pertenecer a un conjunto y a su complemento!*

⁹⁹. Recordemos que el complemento de un conjunto, son los elementos que no pertenecen al conjunto pero sí al conjunto universal.

Para comprender lo anterior, utilicemos una de las definiciones de complemento $\bar{A}$ de un conjunto difuso A , el complemento de Zadeh: $m_{\bar{A}}(x) = 1 - m_A(x)$. Utilizando el ejemplo del conjunto difuso J , su complemento será, de acuerdo con esta definición, la función indicada en la figura 6.12:

Figura 6.12

Una persona de 30 años pertenecerá al conjunto difuso “No joven” con un grado de pertenencia de 0.1 y al “Joven” con 0.9. Nótese que el complemento de “Joven” no es “Viejo”; es “No joven”.

Con respecto a las lógicas difusas, las lógicas en general parten de las definiciones de los elementos básicos de: negación ($\sim$: no), conjunción ($\vee$: y), disyunción ($\wedge$: o), implicación ($p \rightarrow q$: si p entonces q) y equivalencia ($p \leftrightarrow q$: p es equivalente a q). Para el caso de las lógicas difusas, hay diversas maneras de definir estos operadores, por lo que surgen diferentes tipos de ellas, con muy diversas aplicaciones. Aquí es posible expresar simbólicamente expresiones como “tal vez”, “quien sabe”, “más o menos alto” etc. También se habla de números difusos, variables difusas, restricciones difusas y programación difusa¹⁰⁰.

6.3 Hacia una lógica sistémica

De alguna manera, gran parte de lo discutido hasta aquí está basado en la lógica tradicional, con excepción de la lógica polivalente derivada de los conjuntos

100. Para conocer un poco más sobre esta teoría véase el APÉNDICE literal A.6.8.

difusos. Algunos autores claman por un enfoque diferente, argumentando que la *lógica del todo* está lejos de poder ser comprendida y postulada en términos de una lógica tradicional, bivalente, e incluso, difusa.

A. Angyal en *A logic of Systems* (en Emery, 1976) hace notar que nuestro conocimiento científico actual consiste primordialmente en la manipulación de la lógica de relaciones. En general, las proposiciones tradicionales de la matemática son del tipo "x está relacionada con y mediante la propiedad p". Algunos tratadistas de sistemas insisten en que la estructura de los "todos" no puede ser descrita en términos de relaciones. Los términos a utilizar deben ser ciertas unidades lógicas distintas. Tal unidad, según Angyal es el sistema: es la unidad lógica que permite el tratamiento de los "todos".

La tarea de llevar a cabo la construcción de esta nueva lógica es titánica, no sólo por la dificultad que toda tarea novedosa implica sino por el hecho adicional de obligarnos a concebir el mundo en términos lógicos diferentes a los que estamos habituados. Podemos, sin embargo, dar una idea de algunas características de esta nueva manera de pensar usando como medida de comparación la lógica bivalente tradicional. La razón de incluir el tema aquí no es la de disponer de una herramienta alterna para el estudio de los sistemas, pues hemos dicho que tal lógica aún no existe; pero es de suma importancia analizar sus razones y fundamentos ya que esto nos da una comprensión mayor del tema de los sistemas y de la importancia de su estudio.

Una primera distinción entre la lógica tradicional y la lógica de los sistemas descansa en que la lógica de las relaciones requiere sólo dos elementos para establecerse. Las relaciones más complejas son siempre reducibles a relaciones entre pares de elementos. Para el caso de los sistemas, esto no es posible. Un sistema no es un complejo de relaciones. Es imposible decir qué relación debe haber entre a y b , b y c , c y d etc. para que a , b , c y d ... sea un sistema lineal. Es la consideración global lo que lo define (recordemos a la psicología Gestalt en cuanto a la percepción). La figura 6.13 ilustra el caso.

Recta y algunos puntos sobre ella

Fig 6.13

Otra distinción sustancial parte del hecho de que las relaciones entre objetos se refieren a cualidades inmanentes de los mismos, a sus atributos. Así, ellos se relacionan por su peso, longitud o cualquier otra propiedad (o propiedades pero que en conjunto obran como una sola) que les sea común. Antes de poder establecer una relación entre elementos es necesario especificar cuáles aspectos de los elementos servirán de base a la relación. Podríamos decir que se trata de un aspecto “externo”. Por el contrario, los miembros de un sistema no llegan a ser constituyentes del sistema gracias a sus cualidades inmanentes, sino por medio de su distribución o arreglo dentro del sistema. Ellos participan en el sistema, no por una propiedad inherente sino por su valor posicional en el sistema. Volviendo a la figura 6.13 poco importa si son letras (*a, b, c y d*), puntos, cruces u otros objetos los miembros del sistema, si su arreglo de los valores posicionales sigue siendo el mismo, para definir un sistema lineal. Una vez logrado un valor posicional para los constituyentes (elementos) de un sistema, pueden establecerse “relaciones secundarias” no basadas en las propiedades inmanentes de los elementos, sino en valores posicionales secundarios. Recordemos a Gould en el numeral 4.1.7.

Una tercera distinción surge de una característica común a las relaciones y a los sistemas: la multiplicidad de objetos sólo es posible en algún tipo de “dominio dimensional”. Tal es el caso de los dominios espacio y tiempo. No podemos hablar de dos objetos, salvo si están puestos en diferentes puntos del espacio o en diferentes puntos en el tiempo, o en general si es posible definir algún tipo de distancia para alguna otra clase de dominio dimensional. Aunque tal dominio es necesario tanto para las relaciones como para los sistemas, su función es diferente en estos dos tipos de géneros lógicos. Para el caso de las relaciones, el papel del dominio dimensional es sólo de separación (individualización) de los elementos. Su función termina allí. El dominio en sí no entra en las relaciones. Para el caso de los sistemas, el dominio está íntimamente ligado en su formación. El sistema es dimensional: un sistema es una distribución de miembros en un dominio dimensional. Salk (Citado en Skyttner, p. 184) comenta que las relaciones dimensionales espacio-tiempo, crean una quinta dimensión: el todo (el sistema) Este aspecto aparecerá cuando hablemos de los sistemas sociales vistos desde la Teoría de la Complejidad, teoría que es nuestro siguiente tema.

6.4 Resumen

En capítulos anteriores hemos visto que la teoría de las ecuaciones diferenciales ordinarias y el álgebra lineal han sido utilizadas para describir matemáticamente dos puntos de vista teóricos de los sistemas. También hemos insistido en que, en el caso de los sistemas humanos, la matemática es limitada para representar su complejidad.

Nuevas perspectivas se han abierto al respecto. En primer lugar, la termodinámica irreversible destaca la imposibilidad que tienen muchos fenómenos reales de poseer la característica de reversibilidad tan defendida por la ciencia clásica. El tiempo newtoniano permite movernos a lo largo de la mecánica tradicional en cualquier sentido. La “predicción” del pasado y la del futuro son posibles. Sin embargo, la irreversibilidad está presente a la vuelta de la esquina. Procesos tales como nacimiento-muerte, caída de arriba hacia abajo, calor que se trasmite de lo más caliente a lo más frío, un vaso que se quiebra al caer, un líquido oscuro que se diluye en uno claro, y la misma evolución jamás pueden deshacer su camino. Surge el concepto termodinámico de “entropía” que permite medir y predecir estos procesos, además de plantear que en un sistema cerrado la entropía siempre aumenta: es irreversible y le traza una dirección al tiempo.

Pero, por otra parte, se encuentran procesos que sin violar la irreversibilidad del sistema y su ambiente, si son vistos como un todo, violan esta tendencia al aumento, sustrayendo de su ambiente la energía y la información necesaria para crear “islas” de orden. Se trata de las estructuras disipativas. Concluimos, pues, que orden y desorden son dos caras de una misma moneda. Ellos no se oponen; se complementan.

La visión de la entropía desde la mecánica cuántica brinda un puente extraordinario entre esta medida del calor cedido y la medida de la información transmitida mediante un conjunto de símbolos. Para ello hemos destacado un isomorfismo: la cantidad de “sorpresa” que un símbolo puede suministrar permite medir su capacidad de transmitir información y, por lo tanto, evaluar nuestra ignorancia; a su vez, esta “ignorancia” se correlaciona con el “desorden” de la actividad molecular, la entropía. A mayor “ignorancia” mayor entropía. Se dice entonces que la entropía es una medición del desorden de un sistema pero, como se aclaró, no como una medición del desorden estético, sino como

medida de nuestro desconocimiento con respecto a los niveles cuánticos del sistema.

La Teoría de Conjuntos Difusos da una nueva perspectiva de cómo modelar la complejidad de muchos sistemas, incluso en aspectos netamente humanos. La idea de “grado de pertenencia” permite establecer propiedades que no les son dadas a los conjuntos clásicos o nítidos: aquellos en los cuales el elemento pertenece o no pertenece al sistema. Aquí, por el contrario, se puede pertenecer a un conjunto con un grado de pertenencia dado, y a su complemento con otro grado de pertenencia, lo cual es imposible para los conjuntos clásicos. Es la ley del tercio excluido: o se está en el conjunto, o se está en su complemento. Las lógicas polivalentes surgen naturalmente. Ya podemos modelar frases como “tal vez me gusta este más que este otro”, o “es un poco más alto que”, o “la película estuvo más o menos interesante”...

Como parte final, se plantean las condiciones que debe cumplir una lógica que realmente sea sistémica, es decir, que parta de las características que un sistema tiene y en el cual, si bien las relaciones de sus elementos son importantes, su posición en el sistema también lo es. Desafortunadamente en esta línea de investigación es muy poco lo que se ha avanzado.

CAPÍTULO 7.

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD INICIOS

7.0 Ideas generales

Este texto tiene como objetivo fundamental la “Teoría General de Sistemas”. Bajo su mirada el aislamiento, el reduccionismo, la linealidad y, como consecuencia, el estudio de los sistemas aislados y cerrados, han sido criticados, ya que esto impide la consideración de fenómenos complejos que trascienden la dificultad básica de explicar y predecir un todo a partir de sus elementos.

Esta teoría aboga por una comprensión de los sistemas abiertos, en los cuales se destaca la interacción del sistema (en nuestro caso los sistemas emergentes) con el entorno que lo rodea: su ambiente. Estos sistemas, como lo sabemos, se caracterizan por poseer comportamientos globales no predecibles a partir de sus elementos. Esta propiedad es la que demarca la complejidad.

Existe otro enfoque que, en esencia, tiene los mismos objetivos, pero con procedimientos diferentes: la *Teoría de la Complejidad*. Un texto de sistemas que no haga una referencia explícita a ella quedaría corto en su pretensión. Por lo tanto, este capítulo y el siguiente estarán dedicados a una somera visión de esta nueva fuente de conocimiento. De todas maneras, ya antes hicimos referencia a la opción de hablar de una “Teoría General de Sistemas Complejos”.

Como dice M. Mitchel, hacia la mitad del siglo XX muchos científicos se dieron cuenta que la metodología clásica de la ciencia, su reduccionismo fundamentalmente, no podía explicar ciertos fenómenos relacionados con el caos, la biología, la economía, la Teoría de Redes: es decir, no eran explicables a partir de componentes simples. Entonces, aparecen nuevas áreas del conocimiento: la cibernética, la sinérgica, la ciencia de los sistemas y, últimamente, la ciencia de los sistemas complejos. En 1984, un grupo interdisciplinario compuesto por 24 prominentes hombres de ciencia (economistas, físicos, psicólogos, matemáticos...) se reunieron en el desierto de Santa Fe, Nuevo México, para discutir este “emergente campo de la ciencia”. El objetivo: “realizar investigaciones en un gran número de sistemas altamente interrelacionados y complejos que sólo

podían ser estudiados en propiedad en un ambiente interdisciplinario”. También buscaban, como en el caso de la Teoría General de Sistemas, una unidad del saber, contraria a la creciente polarización de los conocimientos actuales. Surge, entonces, el Instituto Santa Fe como un centro de estudios de estos sistemas. También en la universidad de Illinois, en 1986, se crea el “Centro para los sistemas complejos”.

¿Qué tienen en común y en qué se diferencian la Teoría General de Sistemas (T.G.S.) de la Teoría de la Complejidad (T.C.)?

En común tienen:

- El rechazo al reduccionismo y a la linealidad como elementos básicos para concebir (modelar, definir) el objeto de estudio o sistema y el aislamiento del mismo, conceptos que permiten desarrollar los constructos mentales a los que hemos hecho referencia anteriormente, y así facilitar su descripción matemática.
- Las interrelaciones e interdependencias de los objetos que conforman al sistema y sus atributos. Elementos no interrelacionados –independientes–, no pueden conformar un sistema.
- Existencia de equifinalidad. Sin metas, objetivos o propósitos, declarados o no, no puede existir un sistema. Esto tiene como condición implícita la existencia de otro sistema que lo rodea: su ambiente. En esencia, debe existir una jerarquía sistémica.
- La existencia de un ambiente implica que deben existir entradas y salidas desde y hacia el sistema.
- Tendencia a la disminución de la entropía. En otros términos la existencia de una organización interna y por lo tanto, de una autoregulación.
- La existencia de elementos diferenciados, que en el caso de la teoría de la complejidad se denominan *agentes*.
- Ambas teorías destacan la importancia de la interdisciplinariedad y resaltan, como se ha visto, el concepto de sistema abierto. El estudio de las interrelaciones entre las partes y entre éstas y el entorno, es fundamental.
- Se recalca la propiedad emergente de los sistemas, como el elemento clave del comportamiento complejo. El todo ya no es deducible de las partes. Las partes, los objetos en sí, no son lo más importante, sino sus interrela-

ciones. Lo que denominamos "partes" no son otra cosa que patrones que conforman redes entre redes. Ambas teorías pasan de las partes al todo o de los objetos a las interrelaciones. Los patrones se identifican de manera visual. Configuraciones que se repiten. Cuando diseccionamos un sistema, lo que se destruye es su patrón; las partes quedan, pero el sistema como tal, desaparece. El patrón es la "causa" de la complejidad.

En cuanto a las diferencias indiquemos las siguientes:

- Para la T.G.S. lo fundamental es considerar el todo, para luego concebir las partes. Intenta explicar el comportamiento de las partes a partir de las leyes que gobiernan el comportamiento del todo: explicar el comportamiento de los individuos a partir de los roles que ellos juegan en las instituciones o en la sociedad que supuestamente están gobernadas por leyes relacionadas con ese nivel de organización; explicar la acción de un órgano en términos de su contribución a la supervivencia del organismo; explicar las creencias de un grupo en términos de sus patrones culturales. En la T.C. las partes son identificadas *per se*. Se comportan de manera independiente, egoísta, pero sometidas al cumplimiento de reglas estrictas que deben cumplirse. En la T.G.S. el todo determina las partes. Aquí no.
- La T.G.S. incluye cierto tipo de sistemas los cuales pueden desplegar voluntad, tener propósitos comunes. Como veremos enseguida, a la Teoría de la Complejidad le interesa considerar los elementos básicos que conforman un objeto de estudio (el sistema) los cuales reciben el nombre genérico de agentes: programas autocontenidos que pueden controlar sus propias acciones basadas en la percepción de sus ambientes operacionales y sus interrelaciones (2005, Huhns y Singh, en Gilbert & Trostzsch p. 172). Tales agentes no tienen propósitos comunes, ni elementos que centralicen el comportamiento con el fin de obtener un sistema con objetivos. Lo más cercano es considerar que los agentes deben seguir ciertas reglas, aplicadas en forma individual. En el prelude de su libro Mark Buchanan (2002) comenta que gran parte de la complejidad inherente a las sociedades humanas, tienen poco que ver con nuestra compleja psicología; de hecho, muchos patrones similares aparecen en otras situaciones en las que los seres conscientes no desempeñan ningún papel en absoluto.
- La T.G.S. se ocupa de la organización de los sistemas, de las relaciones entre estructuras y procesos lo cual "define" la red que los conforma. El elemento "mínimo" es el subsistema que establece una red de redes. En la

T.C. el interés se centra en la autoorganización. El concepto fundamental es la red. Su elemento “mínimo” es el nodo (el agente).

- En la T.G.S., la matemática básica es la ecuación diferencial y las ecuaciones de diferencia, cubriendo así la continuidad y la discontinuidad en el proceso de modelado. En la T.C. aunque también se usa este tipo de matemáticas, se recurre además a la simulación matemática, como por ejemplo la simulación en términos de redes booleanas (de dos variables que toman los valores de cero o uno) y la geometría por repetición (fractales). Se habla, así mismo, de redes neuronales artificiales (redes computacionales que imitan las redes de neuronas del cerebro), de lógicas no clásicas (como las lógicas difusas y la lógica cuántica en donde entra en juego el principio de incertidumbre de Heisenberg), de meta-heurísticas (Robby, el robot limpiador de M. Mitchel, por ejemplo) y de hipercomputación (computación no realizable por una máquina de Turing). De hecho, la herramienta fundamental es el computador y el uso de lenguajes y software especializados. Podemos citar NetLogo, Swarm, RePast, Unified Modeling Language (UML)...algunos de ellos disponibles gratis en la red.
- Es importante aquí hacer una aclaración. La simulación tiene dos enfoques generales. Uno de ellos considera que el comportamiento total del sistema depende del comportamiento de elementos que son, en general, equivalentes, homogéneos, es decir, descrito uno de ellos, todos los demás quedan identificados. El otro enfoque se centra en sistemas en los cuales el comportamiento de cada individuo, con sus características, interactúa con otros generando el comportamiento complejo que tales sistemas manifiestan. A este segundo enfoque se le conoce con el nombre de microsimulación; es la simulación de sistemas de multiagentes. Al primero se le denomina simulación de sistemas distribuido en forma estándar o concurrente, de uso común en la T.G.S.

La simulación por multiagentes es un subconjunto de la concurrente. Por lo tanto, debe estar asociada a este tipo de investigación ya que, de otra manera, los resultados serían poco confiables. Sin embargo, ella debe conservar la característica fundamental de la independencia de los agentes, lo cual reduce la importancia de la sincronización y coordinación y la característica de la lucha por un recurso escaso (un aspecto económico) que no se da en la clásica, ya que en esta existen objetivos o propósitos que lograr: el bien individual por contraposición al bien común. (M. Wooldrige, 2002, p. 8).

- Aunque ambas critican al reduccionismo, la T.C. está más cerca de los procedimientos de la ciencia clásica. Y aunque algunas de las teorías que forman parte de la T.G.S. también lo hacen, otras han tratado de establecer un interregno entre ellas y los métodos analíticos tal y como se explicará, con cierto detalle, en el capítulo 9.
- En la TGS se destacan las metodologías. En la T.C. los modelos matemáticos. La primera diferencia los fenómenos naturales de los humanos destacando el concepto de propósito; la segunda los trata bajo un mismo enfoque.

Como parte final de esta comparación, agregaremos que si bien no existe una *Teoría General de Sistemas* tampoco existe una *Teoría de la Complejidad*. En este texto hemos comentado la posibilidad de proponer una teoría de sistemas abiertos, que podría cubrir estas dos teorías.

Algunos investigadores consideran que “es posible desarrollar una Teoría de la Complejidad que, análoga a la física, tendría leyes fundamentales que se pueden encontrar en la base de la complejidad y que, por definición, deberían ser leyes simples o elementales (Maldonado, 2009)¹⁰¹. A este respecto, el libro de Holland (2014) presenta una interesante visión.

Dicho lo anterior, veamos un poco más de cerca esta importante teoría.

Neil Johnson (2009, p. 4) indica que el elemento fundamental de la complejidad es la situación en la cual una colección de objetos, que en forma general se denominan agentes como ya se indicó, compiten por algún recurso limitado: vía necesitada, dinero de los compradores, territorio o poder político, espacio y alimento de un órgano del cuerpo, recursos naturales escasos... Estos agentes obran independientemente, en forma egoísta (es la descentralización), pero deben cumplir ciertas reglas: respetar las leyes de tránsito, obedecer los reglamentos que rigen el libre mercado, actuar bajo el marco de una constitución política nacional... Esta colección genera propiedades emergentes, que pueden ser “favorables” o “desfavorables”. En el primer caso, tenemos sistemas complejos “estables”, es decir, con un comportamiento normal. En el segundo caso, tendemos situaciones en las cuales el sistema se ve amenazado. El sistema oscila entre estados “ordenados” y “desordenados” sin que exista una “mano invisible”, un sistema de control o coordinación que guíe al sistema. El sistema se autoorganiza de tal manera que el fenómeno aparece por sí mismo “como por magia”.

101. Remitimos al lector a los últimos párrafos del numeral 5.1.3.

El sistema no tiene propósitos predefinidos, es teleonómico. El elemento clave de esta propiedad emergente es la retroalimentación. Lo extraordinario de la situación es que, a pesar del comportamiento “egoísta”, el sistema puede, bajo ciertas circunstancias, mostrar un comportamiento autoorganizado (o colapsar): es la centralización. Vemos cómo las dos leyes se dan simultáneamente. Podríamos decir que hay dos tipos de propósitos: individuales y colectivos. Para la Teoría de la Complejidad, los individuales, respetando ciertas reglas, generan los globales o colectivos del sistema, permitiendo la creatividad y evolución del mismo, como indicaremos más adelante.

La complejidad se analiza partiendo del postulado de que ella surge de la simplicidad, lo que es una gran ventaja, ya que si la complejidad tuviera como origen la complejidad, nuestra posibilidad de estudiarla estaría seriamente limitada. Se va, pues, de lo simple a lo complejo. Explica el todo a partir de sus componentes, pero de manera diferente a como lo hace el reduccionismo. Nos recuerda a Descartes (*Cfr.* numeral 3.0) pero con una diferencia. En Descartes está implícito el hecho de que resueltas las partes se resuelve el todo: hay una causalidad directa. En la Teoría de la Complejidad, si bien es posible delimitar las características de las partes, no es posible deducir, ni predecir con exactitud el comportamiento del sistema. Sin embargo, su comportamiento global “surge” y se observa a partir de ellas y es posible establecer patrones de comportamiento.

Como ya lo dijimos, no existe una “Ciencia de la Complejidad”. Ni siquiera el término “complejidad” está definido de la manera como una definición debe ser redactada. Actualmente se investiga sobre este tema desde diferentes perspectivas. Y aunque esto trae como consecuencia que por falta de una buena definición muchos conceptos no pueden ser desarrollados plenamente y en forma coherente, tampoco ello inhibe el proceso investigativo. Como explica M. Mitchel (*Op. Cit.*), es un hecho real que en la formación del conocimiento científico la idea central sobre la cual se discute no es, en sus comienzos, un concepto bien definido. Newton, por ejemplo, no tenía una buena definición de fuerza¹⁰² (de hecho, a partir de los inicios del siglo XIX, se empieza a hablar de una mecánica que excluye el concepto de fuerza, como en el *Traité de Mécanique Rationnelle* de Paul Appell). En la genética, no hay todavía una definición aceptada en forma general de lo que significa el término *gen* a nivel molecular. Los astrónomos han descubierto que cerca del 95% del universo está

102. Actualmente se dice que hay cuatro tipos de ella: electromagnética, fuerte, débil y gravitacional; la combinación de ellas producen los otros tipos de fuerzas conocidas.

compuesto por *materia oscura* y *energía oscura* pero no saben a ciencia cierta en qué consisten estos dos conceptos. En psicología no se tiene una definición precisa de *idea* o *concepto* o a qué corresponden en el cerebro. Tal vez esto se pueda explicar, aunque sea parcialmente, por el hecho de que lo que se utiliza como modelo, son constructos mentales, no *constructos reales*.

Son varias las áreas del conocimiento que se han ocupado del estudio de la complejidad, algunas ya enunciadas:

- La teoría del caos y la teoría de los fractales.
- La mecánica cuántica.
- La cibernética, la computación y la Teoría de la Información.
- La biología virtual. (Kauffman).
- El pensamiento en redes.
- Networking.
- Los sistemas sociales virtuales como sistemas complejos.

Por esta razón, la complejidad ha tenido diferentes medidas, todas ellas limitadas. En resumen podemos citar:

- *Complejidad como tamaño*: número de elementos y número de interrelaciones.
- *Complejidad como entropía*: mayor información generada por el sistema implica mayor complejidad.
- *Complejidad como contenido de información algorítmica*: tamaño del programa de cómputo más corto que pueda generar una descripción completa de sistema.
- *Complejidad como profundidad lógica*: se refiere a la dificultad de construir un objeto (sistema): creación de una secuencia de “0”s y “1”s que codifiquen al objeto. La profundidad lógica sería el número de pasos que requeriría una máquina de Turing para construir la secuencia deseada como un resultado.
- *Complejidad como profundidad termodinámica*: la cantidad total de recursos termodinámicos e informáticos necesarios para el proceso físico de construcción del objeto.

- *Complejidad como capacidad computacional*: si los sistemas físicos y naturales son capaces de realizar cálculos, entonces su complejidad puede medirse en términos de la sofisticación de lo que pueden calcular: un sistema es complejo si sus habilidades computacionales son equivalentes a los de una máquina universal de Turing.
- *Complejidad estadística* se trata de medir la menor cantidad posible de información con respecto al comportamiento pasado de un sistema, que sea necesaria para predecir óptimamente el comportamiento estadístico del sistema en el futuro. A mayor información, mayor complejidad.
- *Complejidad como dimensión fractal*: una medida de la secuencia que detalla el proceso fractal de un objeto: qué tantos detalles podemos ver a medida que nos adentramos más y más en la “infinita cascada de similitudes” que definen un fractal.
- *Complejidad como grado de jerarquía*: grado de formación de jerarquías del sistema con base en su casi-descomponibilidad.

Tal como lo indicamos en el capítulo anterior, haremos referencia a algunas de las visiones que estudian la complejidad. Iniciaremos con la Teoría del Caos.

7.1 Teoría del caos

Algunos definen la teoría del caos como “la ciencia de los sistemas no lineales dinámicos y complejos”. El desarrollo actual de esta teoría ha logrado demostrar que en el aparente desorden de muchos procesos, subyace un orden muy sutil y complejo, difícil de percibir a simple vista. Esta teoría no trata, pues, del estudio del desorden; todo lo contrario: se ha podido demostrar que en el caos se encuentra el origen del orden, tal y como se observó en el caso de los procesos disipativos. Aquí el concepto de orden se une con el de patrón: por complejo que sea el comportamiento de ciertos sistemas y por impredecible que sea un estado particular a partir de ciertos datos, su comportamiento global es identificable; su patrón de conducta puede ser modelado y conocido.

Fenómenos de muy diverso tipo, antes considerados fortuitos, caen dentro del estudio del caos. Se destacan las aplicaciones en astronomía (por ejemplo los giros desordenados de los cuerpos celestes, la franjas vacías en el anillo de asteroides, las inversiones del campo magnético terrestre), en meteorología

(la variabilidad climática junto con la formación de nubosidades y vientos), en biología (el crecimiento de las poblaciones de insectos, el metabolismo de las células, la propagación de impulsos nerviosos, la arritmia de las células cardíacas), en química (la evolución de una reacción química), en física (el movimiento de un péndulo influido por varios imanes, la turbulencia creada por el flujo de un líquido o gas a altas velocidades, las oscilaciones de los circuitos electrónicos, el movimiento de un barco amarrado a una boya, el rebote de una bola de billar) y en la economía (el comportamiento de la bolsa de valores). (Monroy, 1998; Stewart, 2007).

Podemos reconocer al menos tres tipos diferentes de Sistemas Dinámicos (Smith, 2007, p. 33) que son representados por variables cuyos diferentes valores en el tiempo se conocen como estados del sistema:

- *Sistemas Dinámicos matemáticos*. Sistemas definidos por una ecuación de diferencias, en el cual cada nuevo término es calculado con base en el término que le precede, un proceso llamado iteración. Matemáticamente se expresa como: $x_{i+1} = f(x_i)$. Se requiere un valor inicial, x_0 con el cual comenzar el proceso: es lo que se conoce como condiciones iniciales. Un ejemplo concreto es la ecuación (7.1). En estos sistemas definir el Caos es más sencillo, pues se define como una propiedad matemática (Cf. A.7.1).
- *Sistemas dinámicos físicos*. Son los sistemas empíricos que se describen en la física, la biología, el mercado de valores. La secuencia que se origina es la de la medida del ruido (error) de las observaciones reales, no las observaciones en sí, como en el caso matemático, como por ejemplo la dinámica de la bolsa de valores. Aquí los números representan el estado del sistema; en el caso matemático los números son el estado del sistema.
- *Sistemas simulados por computador*. Es la aritmética desarrollada en un computador, de un modelo matemático, como ocurre con la predicción del clima.

Estas distinciones son fundamentales para comprender el concepto de Caos.

Nuestras mejores ecuaciones del clima difieren de nuestros mejores modelos de computación basados en tales ecuaciones, y ambos sistemas difieren del hecho real, la atmósfera de la tierra.

Desafortunadamente, los números para estos tres tipos de sistemas se denominan *series de tiempo*, y debemos constantemente forcejear para mantener en mente la distinción entre lo que estas series de tiempo son: un número ima-

ginario de conejos¹⁰³, la temperatura real de un aeropuerto (si tal cosa existe), la medida que representa esta temperatura, y la simulación en computador de la temperatura en cuestión.

Digamos, con Smith, que son las miradas del científico, del matemático, de los estadísticos y de los filósofos.

La gran dificultad en el manejo de la dinámica de las ecuaciones que explican los fenómenos que caen bajo el dominio de ésta teoría, frenó enormemente su avance. Entre algunos de sus predecesores están George Cantor, con la teoría de los conjuntos transfinitos, Mitchell Feigenbaum con el estudio de la turbulencia en los fluidos, y H. Poincaré con el análisis de los tres cuerpos. Ninguno de ellos dispuso en su tiempo del computador moderno, herramienta fundamental para este tipo de estudios. En efecto, las gráficas (resultados numéricos representados en lo que se denomina espacio de fase) fueron la manera de identificar los patrones que muestran las estabilidades en estos sistemas aparentemente inestables. También es necesario citar la termodinámica irreversible.

Amplíemos un poco más las ideas centrales del mecanicismo indicadas en el capítulo 1. Desde el punto de vista de la física clásica, las relaciones de causa-efecto, perfectamente determinadas por las leyes de la naturaleza, aseguraban la predictibilidad de los fenómenos estudiados una vez conocidas sus condiciones iniciales.

El hecho de que a cada causa le sigue un único efecto y viceversa es la base del determinismo. Esta concepción del mundo fue la que le permitió a Newton desarrollar una teoría que explicaba y predecía una enorme variedad de dinámicas naturales. Por ejemplo sus tres leyes del movimiento y el uso de la matemática como elemento lógico y de cálculo, le permitieron describir y calcular el movimiento planetario y la dinámica de los proyectiles y de las mareas entre otros fenómenos. La herramienta matemática que permitió el desarrollo de esta teoría fue la ecuación diferencial: aquella que describe las tasas de cambio de una variable con respecto a otra, como en el caso del modelo teórico de Bertalanffy. Los modelos matemáticos descritos por este tipo de ecuaciones requieren ciertos valores para resolverlas, los cuales se conocen como *condiciones iniciales*. A partir de allí es posible predecir el futuro y describir el pasado: ante las mismas condiciones iniciales, el comportamiento del sistema siempre será el mismo. Dicho de otra manera, para Newton el pasado

103. Se refiere a la serie de Fibonacci para calcular el número de pares de conejos en el tiempo. Ver APÉNDICE literal A.7.2.

determina el presente y éste determina el futuro. Aunque existen descubrimientos que demostraron que el determinismo no era universal, por ejemplo, cuando se estudia el caso de tres planetas que interactúan simultáneamente (el problema de los tres cuerpos citado anteriormente), o en la descripción del comportamiento del átomo, su influencia sigue siendo aún muy fuerte en muchas investigaciones científicas actuales.

Resolver un sistema de ecuaciones diferenciales no es una tarea fácil. En general, cuando estas son de primer orden, es decir se trata sólo de derivadas de una variable con respecto a otra (se denota por dx/dt , siendo x una variable dependiente de otra variable independiente, t), y lineales –ninguna de las variables es del tipo x^n (n un número real diferente de 1) o son el producto de variables entre sí– la tarea es manejable bien sea mediante el análisis matemático (es decir existe una fórmula general que la resuelva, como son las ecuaciones (5-4) y (5-6) por ejemplo) o mediante aproximaciones numéricas (cálculos realizados con un computador para situaciones específicas). Cuando las ecuaciones son de orden superior (del tipo $d^n x_n / dt_n$) o parciales $\partial^n x_n / \partial t_n$ (n entero >1), la solución puede ser imposible. La razón es la siguiente: la forma clásica para resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales parte de la opción de subdividir en partes al sistema total. Si las interacciones entre las variables son muy fuertes –muchas variables dependen de muchas otras y de sí misma– tal mecanismo no es aplicable.

El determinismo newtoniano es un concepto teórico que se fundamenta en el hecho de que la solución de las ecuaciones que describen el comportamiento de algún sistema dinámico es única para cada tipo de condiciones iniciales. Pero para que esto sea cierto se necesita disponer de precisión infinita en las condiciones y en los cálculos, lo cual es imposible desde un punto de vista práctico. Sin embargo, quedaba claro que si la precisión se aumentaba, la predicción sería más acertada. Siempre existía la idea de poder mejorar la precisión en las condiciones iniciales, y poder obtener esa solución única. Además, la tendencia a una solución única era observable en muchos procesos, aún sin disponer de una matemática de precisión infinita. La Figura 7.1 muestra un caso hipotético de diferentes trayectorias que quedan determinadas por las condiciones iniciales (C.I.).

En 1889 Poincaré presenta su estudio sobre el problema de los tres cuerpos. El cálculo tradicional explicaba en forma aceptable la situación de dos cuerpos que interactúan entre sí debido a la fuerza de atracción gravitacional. Las

Caso hipotético de tres trayectorias, determinadas por sus condiciones iniciales (CI)

Fig.7.1

imprecisiones en las mediciones de la posición y velocidad de los cuerpos (las condiciones iniciales) se podrían mejorar con el tiempo. Sin embargo, cuando se tomaba en consideración un tercer planeta, aún las más ligeras modificaciones en las condiciones iniciales resultaban en comportamientos altamente diferenciados. Aquí la regla de “mejorada la precisión, mejorada la predicción” parecía no tener ninguna validez. En otras palabras, por mucho que se mejorara la precisión en las condiciones iniciales, ante pequeñas diferencias en las mediciones aparecían enormes diferencias en los cálculos de las predicciones. Y esto no era debido al azar ya que las ecuaciones eran determinadas, no aleatorias.

Estas observaciones de Poincaré fueron puestas de lado por los físicos hasta que en 1963 Edward Lorenz, un meteorólogo que había diseñado un modelo computacional para el estudio de las corrientes de aire influidas por el calor solar como base para un modelo más complejo sobre la predicción del clima, observó con extrañeza cómo la continuación de unos cálculos que ya habían sido realizados anteriormente, daban un comportamiento muy diferente al esperado cuando se introducían, como condiciones iniciales, valores aproximados de los datos correspondientes al instante de continuación de tales cálculos. Que diferencias prácticamente insignificantes tengan efectos dramáticos a largo plazo, es lo que se conoce como el efecto mariposa: El tenue aleteo de una mariposa en Hong Kong puede convertirse en el tornado que devastará a Kansas. El clima no podrá ser predicho sino a corto plazo. La figura 7.2 da una idea de lo ocurrido durante este proceso.

Variación de los resultados ante un cambio en las condiciones iniciales

Fig. 7.2

De hecho, esto parece hacerse extensivo al mismo universo: éste es caótico como lo demostró Poincaré para el caso del problema de los tres cuerpos y como se ha observado en estudios relativos a la atmósfera, las placas tectónicas, la economía y el crecimiento poblacional entre otros.

El sistema dinámico (tomado de Monroy, 1997)¹⁰⁴:

$$x_{n+1} = kx_n(L - x_n) \quad (7-1)$$

describe el comportamiento de una población que crece inicialmente en forma exponencial para luego tender hacia un límite L , dependiendo del valor de k . Este límite es impuesto por la misma naturaleza y explica el porqué una población no puede crecer indefinidamente. Los valores de k son generalmente menores que la unidad, pues a menudo representan tasas de crecimiento poblacional. Pero ¿qué ocurre si estas tasas toman valores superiores?

La tabla de la figura 7.3 muestra los resultados de aplicar la ecuación (7-1) con $L=1$ para diferentes valores de k y para dos valores iniciales ligeramente diferentes: $x_0 = 0.400000$ y $x_0 = 0.399999$.¹⁰⁵

104. Esta ecuación pertenece al grupo de las que hacen referencia a crecimientos limitados como las discutidas en el numeral 5.3.1 cuando indicamos el modelo de Bertalanffy. El lector puede tomar como referencia la ecuación diferencial (5-5) y el pie de página correspondiente. La ecuación (7-1) es su aproximación numérica.

105. Para una mejor comprensión de esta ecuación remitimos al lector al APÉNDICE literal A.7.3

N	k=2	k=1+√5	k=4,0	k=2	k=1+√5	k=4,0
1	0,400000	0,400000	0,400000	0,399999	0,399999	0,399999
2	0,480000	0,776656	0,960000	0,480000	0,776656	0,959999
3	0,499200	0,561333	0,153600	0,499200	0,561334	0,153603
4	0,499999	0,796844	0,520028	0,499999	0,796843	0,520036
5	0,500000	0,523867	0,998395	0,500000	0,523867	0,998394
...	...	...	...	...	...	...
55	0,500000	0,809017	0,102592	0,500000	0,809017	0,128944
56	0,500000	0,500000	0,368269	0,500000	0,500000	0,449268
57	0,500000	0,809017	0,930587	0,500000	0,809017	0,989705
58	0,500000	0,500000	0,258378	0,500000	0,500000	0,040755
59	0,500000	0,809017	0,766475	0,500000	0,809017	0,156377
60	0,500000	0,500000	0,715963	0,500000	0,500000	0,527692

Valores correspondientes a diferentes k , ecuación (7.1)

Fig 7.3

Para una interpretación más fácil, los resultados han sido graficados en la figura 7.4.

Gráficas correspondientes a la tabla de la figura 7.3

Fig. 7.4

En la parte superior izquierda de esta figura vemos que la serie, para $k=2$, tiende rápidamente al número 0,5, tanto para $x_0=0.400000$ como para $x_0=0.399999$ y allí permanece. Este número se denomina un “atractor”. Para $k=1+\sqrt{5}$ (~ 3.2361), el sistema rápidamente tiende a dos valores: 0.500000 y 0.809017, para cualquiera de los dos valores iniciales $x_0=0.400000$ o $x_0=0.399999$. Sin embargo, para $k=4$, las dos series se van separando la una de la otra, como puede observarse en el recuadro inferior de la figura 7.4. Ya en la iteración 60 las cifras son totalmente diferentes. Vemos cómo una pequeña diferencia, de 0.000001 en los valores iniciales pueden inducir cambios sustanciales en el comportamiento del sistema. En otras palabras, una pequeña diferencia en las condiciones iniciales, ya no garantiza resultados aproximadamente iguales a medida que el tiempo transcurre en el sistema. De lo dicho surge una conclusión extraordinaria. Si bien la ecuación (7-1) está perfectamente determinada, en donde no aparece ningún término aleatorio o una probabilidad asociada no es posible determinar su comportamiento futuro, *salvo que pudiéramos usar precisión infinita*.

Los fenómenos que caen bajo esta teoría, son impredecibles, pero surgen de procesos determinados. Antes, si algo era impredecible, se decía que era aleatorio. Este concepto ha cambiado radicalmente. Como lo expresa Ian Stewart (*Op. Cit.* p.35): *el caos es el comportamiento sin ley gobernado completamente por la ley*.

Un hecho que se destaca en este tipo de comportamientos es la duplicación del número de atractores. En el ejemplo anterior, el paso de $k=2$ a $k=1+\sqrt{5}$, hizo que el sistema cambiara de uno a dos atractores. Cercano al valor 3.455 el total de nuevo se duplica a cuatro atractores. I. Stewart (p.210) indica que con $k=3.739$ se obtienen cinco atractores (el período de la secuencia es 5): 0.8411372, 0.4996253, 0.9347495, 0.2280524, 0.6582304. Este proceso continúa indefinidamente. En el límite se obtiene una línea porosa que se conoce como el conjunto de Cantor que es un fractal, tema que trataremos en lo que sigue. La gráfica de la figura 7.5 ilustra este importante fenómeno.

Si retomamos los valores de $k=3, 3.5, 3.56\dots$ los valores de los ciclos van de 2 a 4 a 8... ¿Existirá alguna ley respecto a la duplicación de estos atractores? Mitchell Feigenbaum encontró que estas secuencias tienden a un valor específico δ (Wikipedia):

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_{n+1} - \mu_n}{\mu_{n+2} - \mu_{n+1}} \quad (7-2)$$

Proceso de bifurcación durante la duplicación del período

Fig. 7.5

en donde μ_n es uno de los valores en donde se produce una bifurcación. Este límite es igual a 4.6692016...

¿Sería este valor de escalamiento exclusivo de la ecuación (7-1)? La secuencia $x_{n+1} = k \sin(x_n)$, también lo cumple, siempre y cuando la secuencia se renormalice (APÉNDICE, A.7.3). En general cualquier función $f(x)$ que tenga cuando menos una tercera derivada y no tenga máximos relativos, cumple con esta propiedad. También siguen esta propiedad las transiciones de fase.

Existe otro número relacionado con el proceso de bifurcación, también descubierto por Feigenbaum:

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{d_n}{d_{n+1}} \quad (7-3)$$

cuyo valor es 2.502907875... y que mide la relación entre dos distancias sucesivas entre las ramas más cercanas. En la figura 7.5 la longitud de separación de las ramas más pequeñas es menor que la de las ramas más largas y siguen esta proporción.

Anteriormente hicimos referencia al trabajo de Lorenz. El modelo con el cual inició el estudio del clima, es un conjunto de tres ecuaciones diferenciales ordinarias de tres variables, x , y , z , que describen el estado del sistema. Estas ecuaciones son¹⁰⁶:

106. a , b , c son parámetros mayores que cero. Generalmente se usa $a = 10$, $c = 8/3$ y

$$\begin{aligned}dx/dt &= a(y - x) \\ dy/dt &= x(b - z) - y \\ dz/dt &= xy - cz\end{aligned}\tag{7-4}$$

La figura 7.6¹⁰⁷ muestra un comportamiento típico del sistema (7-4). Son los puntos en los cuales este sistema tiene solución.

Atractor de Lorenz

Fig. 7.6

¿Cuál es la importancia de este patrón? Si bien no podemos predecir el punto exacto (ni aproximado) donde estaría el sistema bajo ciertas condiciones iniciales, si sabemos la porción del espacio donde estará tal solución y dónde no. Una diferencia sustancial con el azar. La forma de mariposa del atractor de Lorenz puede haber inspirado el nombre del efecto mariposa en la Teoría del Caos.

Como parte final a esta presentación digamos que los sistemas caóticos se caracterizan por tres propiedades: dependencia sensible (dependencia de las condiciones iniciales), determinismo y no linealidad. (Smith, L.,2007).

b es variado, con condición inicial $(0, 1, 0)$. El sistema exhibe un comportamiento caótico para $b = 28$ pero muestra órbitas periódicas para otros valores de b .

107.http://es.wikipedia.org/wiki/Atractor_de_Lorenz.

7.2 Teoría de fractales

Por la misma época en que se desarrollaba la teoría del caos una nueva geometría hacía su aparición. Fue Benoit Mandelbrot (1987) el creador de este nuevo lenguaje matemático que se conocería como *geometría fractal* (del latín *fractus*: fragmentado, fracturado, roto).

Su origen se encuentra en el intento de Mandelbrot de explicar los fenómenos irregulares presentes en la naturaleza. Aunque algunas de sus formas se asemejen a ciertas figuras de la geometría tradicional, como por ejemplo hojas que son triangulares, elipsoides o cardiodes (en forma de corazón), montañas que asemejan conos o semiesferas, no menos cierto es que son pocas las opciones de representación con esta visión, y de todas maneras es bastante imprecisa.

Un *fractal* es la figura geométrica que surge cuando una regla geométrica sencilla se aplica repetidamente. El hecho de repetir el patrón de formación hace que si se toma una parte de una figura así generada, este patrón se encuentra en dicha parte. Es como si la parte fuera igual al todo. La figura obtenida es extraordinariamente compleja. Estas estructuras se encuentran en muchos comportamientos y formas de la naturaleza.

Se puede citar como trabajos previos al desarrollo de Mandelbrot, los estudios de Cantor (el llamado *conjunto de Cantor*¹⁰⁸) y en general los que Poincaré y otros matemáticos han denominado "monstruos matemáticos": objetos matemáticos que no encajaban en el mundo ordenado de las matemáticas del momento. Tomemos de J. Gribbin (p.133) el caso de la curva de Peano.

Peano propuso un plano limitado (digamos una hoja de papel) y sobre ella demostró cómo era posible trazar una recta que, curvándose sobre sí misma en los extremos de la hoja, se "devolviera", sin cruzarse. Al repetir este procedimiento *ad infinitum* la curva llenaría completamente el plano. Pero una línea recta no posee la dimensión de anchura, sólo posee la longitud. ¿Cómo era posible que entonces, pudiera generar un plano? ¿Cómo podría un plano ser realmente bidimensional, si todo punto del plano estaba contenido en una sola línea? Lo que realmente Peano había descubierto era un fractal. Ya se vislumbraba el concepto de dimensión fractal.¹⁰⁹

108. Es el conjunto resultante de tomar un segmento de recta y dividirlo en tres partes iguales, eliminándose el segmento central. Con los segmentos restantes se repite la operación, indefinidamente.

109. En el APÉNDICE A.7.4 se amplía este concepto.

Un ejemplo de fractal, muy citado, es la curva de Koch. Se toma un segmento de recta y se divide en tres partes iguales. Se reemplaza el segmento central por dos lados de un triángulo equilátero. El procedimiento se repite indefinidamente. La figura 7.7 muestra el procedimiento en sus dos primeros pasos.

Curva de Koch

Fig 7.7

Cuando esta regla se aplica en forma repetitiva a un triángulo equilátero, la figura tiende a la forma de un cristal de nieve como se muestra en la figura 7.8.

Estructura fractal de un copo de nieve

Fig 7.8

Una propiedad importante es que la curva de Koch, inicialmente de longitud finita, en el límite es de longitud infinita y discontinua en cada punto. La complejidad, de por sí ya grande, puede aumentarse en forma impresionante si los modelos incluyen en su planteamiento matemático números complejos. Las series de Gaston Julia fueron los primeros estudios de Mandelbrot en este campo.

Si z es una variable compleja y c un número complejo¹¹⁰, la serie de Julia se puede representar mediante la relación:

$$z_{k+1} = z^2k + c \quad (7-5)$$

Dando diferentes valores iniciales a z , para un valor de c dado, algunos harán tender la serie al infinito y otros no. Las series de Julia son el conjunto de valores de z (puntos en el plano complejo¹¹¹) que mantienen la ecuación (7-5) en valores finitos (la serie converge). Estos valores, al representarse en dicho plano, forman patrones intrincados pero definidos. Al ampliar una parte de alguno de los patrones obtenidos, se obtiene un patrón similar, lo cual muestra cómo estas series son fractales geométricos¹¹². La figura 7.9 muestra el fractal resultante de la ecuación. En este concepto la teoría de fractales se encuentra con la del caos: los fractales son atractores extraños.

Conjunto de Julia, un fractal. $c = [0.285, 0.01]$. De Wikipedia.

Fig 7.9

110. Recordemos. Un número complejo se compone de un número real y uno imaginario. Si a y b son reales, el número $(a + ib)$ es complejo, compuesto por la parte real, a y la parte imaginaria, ib para $i = \sqrt{-1}$.

111. En un eje bidimensional de coordenadas el número complejo $(a + ib)$ se representa con el real a en el eje x , y el imaginario b en el eje y .

112. En la dirección <http://bcz.emu-france.com/julia.htm> es posible obtener un software que ilustra como al aumentar la imagen de un fractal, este empieza a mostrar patrones similares al objeto inicial.

En la naturaleza hay muchos procesos que generan formas irregulares. Sin embargo, vale la pena destacar tres que son muy comunes. Estos son los procesos de *separación de fronteras*, de *ramificación o formación de árboles* y de *formación de porosidad* (Guzmán *et al.*, 1993, p. 2-). La frontera de separación se refiere al hecho de que miradas desde cualquier escala, siempre se observan incursiones de un medio en el otro, por lo que al aumentar el grado de resolución del fractal, sus medidas aumentan indefinidamente. Es el caso de la longitud de la curva de Koch indicada más arriba.

La ramificación se refiere al hecho de que parte de la geometría inicial se “abra” en nuevos brazos siguiendo una regla repetitiva (recordemos la duplicación de atractores en la teoría del caos).

En la curva de Koch la bifurcación se realiza al reemplazar el segmento central por dos lados de un triángulo equilátero, de longitud igual al segmento suprimido.

La formación de “poros” se refiere a la exclusión de ciertas zonas que no cumplen con las reglas de formación propuestas. En las curvas de Julia indicamos que el fractal resultante no incluye los puntos en los cuales la serie se hace infinita. Aquí se ocasionan “islas” o poros que dan forma particular al patrón respectivo; de lo contrario, todo el plano complejo quedaría incluido.

Como herramienta para el estudio y comprensión de la complejidad, la teoría de fractales permite proponer modelos matemáticos que se aproximan bastante bien a los objetos reales que tratan de modelar. No estamos diciendo que las formas de la naturaleza se obtienen a partir de procesos fractales; pero sí parece interesante pensar que siendo los fractales resultado de la repetición de reglas geométricas sencillas, es más fácil sugerir que el ADN esté almacenado de esta forma que proponer que una réplica de toda la complejidad de la vida está almacenada, hasta cada detalle, en las células.

Como puede notarse por lo dicho anteriormente la característica fundamental de los fractales es la autosimilitud. Si dicha similitud es exacta, si la ampliación de la parte es equivalente al conjunto original, diremos que el conjunto es *estrictamente similar*. Si lo que se repite son propiedades estadísticas de interés para el investigador, entonces se dice que el conjunto es *estadísticamente autosimilar*.

Un primer ejemplo es el uso de los fractales para describir costas, bordes de una nube, superficies de montañas, o fronteras entre países. También es posible modelar un río y sus afluentes, el sistema arterial y redes capilares.

Estos conceptos se han extendido a los llamados paisajes fractales que se asemejan sorprendentemente a paisajes reales. Para construirlos básicamente se subdivide un cuadrado en cuatro cuadrados iguales y luego se desplaza aleatoriamente su punto central compartido. “El proceso se repite recursivamente en cada cuadrado hasta que se alcanza el nivel de detalle deseado”. La figura 7.10 muestra un ejemplo.

Amanecer en un paisaje desértico, generado con el programa Terragen. Tomado de Wikipedia

Fig. 7.10

Existen aplicaciones importantes en el campo de la ingeniería, como es el caso de las antenas fractales. Estas antenas utilizan los fractales para obtener un diseño que maximice el perímetro con el fin de recibir o transmitir señales electromagnéticas. La combinación fractal de la antena permite una mezcla de alto rendimiento con robustez. Estas antenas son muy compactas, de tipo multibanda o banda ancha con aplicaciones útiles en telefonía celular y comunicaciones por microondas. Trabajan de manera muy superior a las tradicionales y permiten la transmisión de frecuencias diferentes simultáneamente. Adicionalmente la teoría de fractales ha contribuido al campo de la psicología, la lingüística, la superconductividad etc.

7.3 Teoría de catástrofes.

En 1972, René Thom publicó su obra *Stabilité Structurelle et morphogénese* (estabilidad estructural y morfogénesis). Su idea central era la explicación

de las dinámicas no continuas observadas en algunos fenómenos naturales tales como la división de una célula (que parece darse en forma abrupta), la caída de un puente en donde no parece haber solución de continuidad entre las condiciones que lo mantienen unido y las que lo colapsan, o las fronteras entre dos tejidos. Las matemáticas del continuo, representadas en su forma más depurada por las ecuaciones diferenciales, tienen como fundamento la continuidad. Pero, a pesar de los inmensos aportes que han recibido por parte de los grandes matemáticos de los últimos tiempos, son muy limitadas para la construcción de modelos biológicos y sociales. No sólo estos modelos presentan discontinuidades (al menos aparentes) sino que, en general, no siempre se dispone de la precisión en la medida de las variables exigida por los modelos matemáticos del continuo. Esto indujo a Thom a considerar a la topología diferencial como el lenguaje matemático más adecuado. Esta teoría ha sido criticada por algunos científicos por su carácter aparentemente especulativo. Como dice Miguel Espinoza:

Ahora bien, sospechosos de las ambiciones de la teoría y de su carácter cualitativo (consecuencia de las herramientas topológicas), varios científicos y epistemólogos han criticado la teoría de Catástrofes, tratándola de pseudocientífica. Pero convencido del valor de su intuición (aunque no de todas las maneras de explotarla por parte de otros autores “catastrofistas”), Thom ha reforzado sus ideas con una reflexión sobre los objetivos de la ciencia moderna y sus presuposiciones positivistas y materialistas. El resultado es una serie de pensamientos que restauran el interés de algunos problemas olvidados de la filosofía de la naturaleza, de la cosmología o de la metafísica.

La teoría de catástrofes se refiere, pues, al estudio de las discontinuidades en los fenómenos que estudia sin tener en cuenta a los mecanismos que las generan. Más que una teoría es un lenguaje descriptivo de ciertos fenómenos dinámicos complejos.

Un ingenio sencillo, que muestra el concepto de catástrofe, es la máquina de Zeeman (figura 7.11). Tomemos la descripción de Saunders: (1983, p. 4-).

Se trata de dos bandas elásticas de aproximadamente la misma longitud, la cual se tomará como unidad cuando no están estiradas. Se corta un disco de cartón resistente, de diámetro igual a la unidad y se fija por su centro *O* en una base adecuada. Cerca de su borde se fija un alfiler, por ejemplo en *Q*. A una distancia de aproximadamente dos unidades y sobre un eje vertical se

Máquina de Zeeman

Fig 7.11

fija una de las bandas elásticas (punto R en la figura). La otra punta, así como una de las puntas de la banda restante se fijan en el punto Q . El otro extremo de la banda quedará libre (punto P en la figura 7.11). Al mover lentamente el extremo P en el plano, se observará que cuando se dan pequeños cambios el disco se mueve lentamente. Pero ocasionalmente, salta de repente. Las posiciones de P en las cuales se producen los saltos se presentan sobre el perímetro de un rombo curvilíneo. Sin embargo, al cruzar el rombo, no se presentan saltos. En cuanto a posiciones de equilibrio estable, existe sólo una fuera del rombo. Dentro del rombo se encuentran dos posiciones de este tipo, en una de las cuales Q está a la derecha y, en la otra, está a la izquierda. Hay una tercera posición de equilibrio dentro del rombo pero es altamente inestable.

La máquina nos aclara varios puntos relativos a esta teoría. En primer lugar, su construcción pudo haberse realizado con dimensiones diferentes. Saunders propuso las aquí indicadas para poder llevar a cabo cálculos matemáticos (que de otra forma hubieran sido difíciles de realizar) para explicar su comportamiento. Con esto resaltamos que lo importante en la teoría no es el análisis cuantitativo sino el cualitativo. Los resultados referentes a puntos sobre un rombo curvilíneo son válidos para cualquier máquina de Zeeman que se construya con otras dimensiones. El patrón de comportamiento se conserva y esto es lo que realmente vale la pena destacar. Por otra parte, queda claro que es posible, en

comportamientos aparentemente regulares (continuos) la presencia de saltos o discontinuidades mediante la desaparición de estados estables. El estudio de tales estados es la idea fundamental de la teoría de catástrofes.

La herramienta básica de Thom es la representación gráfica de los estados estables como un conjunto de puntos (líneas o superficies) que se denomina *espacio de comportamiento* (o *superficie de equilibrio*). En estos puntos el comportamiento del sistema es continuo, pero cuando abandona esta línea o superficie, se presentan inestabilidades que fuerzan al sistema a puntos, en muchas ocasiones, alejados del lugar donde antes se encontraba.

Para sistemas dinámicos de una o dos variables y con máximo cuatro parámetros (tiempo, temperatura...), René Thom demostró que hay siete estructuras de “saltos” o catástrofes elementales las cuales son: el pliegue, la cúspide, la cola de Milano, la singularidad umbílico elíptica, la singularidad umbílico hiperbólica, la mariposa y la singularidad umbílico parabólica. La figura 7.12 indica algunas de ellas (obtenidas de <http://pst.chez-alice.fr/T.C.IvarEk.htm>). Thom llamó catástrofe a lo que se conoce en la teoría del caos como bifurcación (Capra-Luisi, p. 116).

Mediante ciertas transformaciones matemáticas, las coordenadas x , y del plano se transforman en u , v . Este nuevo plano se denomina *espacio de control*. Al variar sus valores, los puntos generados en este plano se denominan *trayectoria de control*. Cuando se dan variaciones regulares en las variables u y v generalmente se dan variaciones regulares en la variable x , salvo cuando la trayectoria de control cruza el conjunto de bifurcación: puntos en los cuales se presentan las inestabilidades (el rombo curvilíneo de la máquina de Zeeman). El espacio de fase (espacio tridimensional de las variables x , u , y) para la máquina de Zeeman es la cúspide, cuya representación está indicada en la figura 7.13.

El cambio repentino se presenta cuando la trayectoria, que se encuentra en la superficie de equilibrio tropieza con un pliegue que lo obliga a “caer”, es decir, refleja el salto de la variable x .

En cuanto a las aplicaciones de esta teoría, son muchas y muy importantes. Tomemos de A. Woodcock y M. Davis (1980, p. 76-)¹¹³ los ejemplos por ellos citados. En física y química, la teoría ha permitido modelar procesos que sólo eran explicable en casos ideales. Por ejemplo, en óptica ha permitido la comprensión de las líneas cóusticas que es la “envolvente de los rayos de luz reflejados o refractados por una superficie curva”; en muchos fenómenos

113. Saunders, *Op. Cit.* también tiene excelentes ejemplos.

Las siete catástrofes de R. Thom

Fig 7.12

naturales (como la formación del arco iris); en resistencia de materiales para la comprensión del fenómeno de la ruptura cuando se aumenta la tensión en una estructura; en la transición de fases del agua. En bioquímica se ha estudiado el fenómeno de la desnaturalización, un proceso mediante el cual las moléculas de proteína cambian de forma debido a cambios de la temperatura, acidez o algún otro factor de control (tal es el caso de la cocción de un huevo que es endurecido porque el calor desnaturaliza la albúmina, permitiendo que esta proteína forme nuevos eslabones). En biología, esta teoría se ha aplicado en varios niveles, desde la bioquímica hasta la genética, la embriología y la teoría de la evolución. No olvidemos que el libro de Thom se refería explícitamente a la morfogénesis: aparición de las distintas formas características del organismo y sus partes constituyentes.

En el comportamiento animal la teoría se ha aplicado a la lucha de las especies por la territorialidad. Los modelos tradicionales consideran un número reduci-

Espacio de fase y espacio de control para la máquina de Zeeman

Fig 7.13

do de especies bajo condiciones en cierta forma ideales¹¹⁴, es decir de su nivel de competencia. En el modelo de Thom los modelos dependen no sólo del nivel de competencia entre las especies sino también del costo de defender el territorio, es decir, la energía necesaria para detener o luchar contra la competencia.

En Sociología y en Economía la teoría ha analizado los procesos de socialización y desorden durante períodos de peligro, las relaciones entre el estatus social y el matrimonio, la competencia y la fijación de precios, las expectativas económicas y la inflación. Incluso, se han hecho análisis sobre el ascenso y caída del Imperio Romano, las revoluciones políticas, los conflictos entre el desarrollo nuclear y la ecología. En sicología hay modelos para la incapacidad de aprendizaje bajo estrés, la esquizofrenia reactiva y la anorexia nerviosa.

La teoría del caos y la de las catástrofes se encuentran en el concepto de atractor extraño y en el de bifurcación, como se indicó anteriormente. De alguna manera comparten estos conceptos.

114. Recordemos el ejemplo predador-presa numeral 5.3.1.

Consideremos el siguiente ejemplo sobre comportamiento territorial (Woodcock & Davis, 1980, p. 93-96). Aquí se define la distribución geográfica de especies diferentes o de especies individuales. El principio de Gause establece que dos especies no pueden coexistir a la larga en una región dada si ambas exigen los mismos recursos al ambiente. Un territorio puede ser muy sutil en su delimitación: se han encontrado, por ejemplo, cinco especies de insectos, que buscan comida y se reproducen, a diferentes alturas del piso en algunos bosques tropicales. En una misma especie, el comportamiento territorial defiende a un animal contra otros que tratan de disputarle un recurso valioso tal como su coto de caza o sitio para anidar.

Es aceptable suponer que el patrón de territorialidad tiene que ver con la defensa del territorio y los riesgos físicos que ello implica y la búsqueda y disposición de alimento. En este ejemplo la territorialidad se refiere a la misma especie, es decir, al establecimiento de jerarquías entre los mismos individuos. En general las luchas se evitan al máximo mediante la delimitación del territorio con marcas olfativas, cantos o gritos y actitudes específicas.

La cúspide se adapta bien para analizar este tipo de fenómeno. En este caso esta superficie tiene como factores de control al nivel de competencia (basada en la densidad de población) y al costo de defender el territorio, tal como se ilustra en la figura 7.14.

Este modelo sugiere que en un nivel bajo de competencia, si el costo de defender el territorio es alto, no existe impulso para competir (punto *a*). Por ejemplo, si hay suficiente alimento y la población no es muy numerosa, no hay razón para reclamar un área como propia, pues se consumiría energía y se correrían riesgos inútilmente. Si tanto la competencia como el costo son altos (punto *b*), se hace necesario establecer jerarquías, una forma menos costosa que realizar enfrentamientos para delimitar un territorio. Es el caso del dominio que ejerce en los lobos, la hembra alfa, para alimentarse.

Si por razones de organización se hace necesario demarcar los territorios entonces se hace una transición suave, pasando de *b* a *c* una situación en la cual el territorio está perfectamente establecido, sin tener que asumir un costo alto para mantenerlo.

Pero si la especie es de tipo no territorial, adaptada a situaciones en donde la competencia es baja y bajo es el costo de defenderse y es sometida a una competencia creciente debido por ejemplo a un crecimiento poblacional excesivo o

Fig. 7.14

a la pérdida de recursos ocasionada por cambios climáticos, el modelo predice una transición repentina (catastrófica) en el comportamiento territorial: ruta *d-e-f*. El punto *f* podría considerarse como un atractor extraño.

Recordemos que estos modelos son de tipo cualitativo y no pueden responder preguntas de tipo cuantitativo, como por ejemplo, cuánta competencia es necesaria para convertir una población migratoria en una altamente territorial. Ellos pueden ayudar a reexaminar estudios existentes, bajo esta nueva perspectiva, con el fin de encontrar respuestas a estas preguntas. También son de gran ayuda para la comprensión de muchos fenómenos que de otra forma encuentran explicaciones demasiado simplistas debido a la exigencia de la cuantificación. Recordemos el modelo de predador-presa al que ya hemos hecho referencia.

7.4 La mecánica cuántica

La mecánica cuántica (o física cuántica) es la parte de la física que se ocupa del mundo subatómico. Suele considerarse aparte de la teoría de la relatividad aunque existe una mecánica cuántica relativista, para partículas que se mueven

a velocidades cercanas a la de la luz y en donde la ecuación de Schrödinger parecería que no se cumple. También existe la teoría cuántica de campos en espacio-tiempo curvo. Lo que sí no se ha podido incluir, relacionado con la teoría de la relatividad, son los conceptos gravitatorios de esta.

Esta teoría surge del hecho de que la física clásica no pudo explicar con exactitud muchos fenómenos debido a la existencia de dos tipos de objetos físicos: las partículas, que se pueden describir por medio de seis parámetros (tres para la velocidad y tres para su posición en el espacio) y los campos que requieren un número infinito de parámetros.

Siguiendo a Penrose (2002), un sistema de partículas y campos está en equilibrio, si ambos lo están. Esto implica que la energía de las partículas debe repartirse por igual entre los grados de libertad del sistema. Como se indicó, los campos requieren un número infinito de parámetros de tal forma que estos campos absorberían toda la energía de las partículas dejándolas sin ella, violando el principio de repartición enunciado. También ocurriría con los electrones, que son partículas, cuando giran alrededor del núcleo, que es un campo electromagnético. Los electrones deberían ser atraídos por este, y tal cosa no ocurre en la realidad.

En el caso de las radiaciones térmicas también se presenta esta contradicción. Las partículas emiten radiaciones electromagnéticas. Para frecuencias bajas las oscilaciones del campo se explican por la física clásica, pero cuando las frecuencias son altas, se debería presentar la catástrofe de la no igualdad de la repartición de la energía (la llamada *catástrofe ultravioleta*). Pero esto no ocurre en el mundo real.

Las partículas necesitaban ser complementadas con el concepto de campo. Varios intentos se hicieron pero fue Max Planck quien dio con una extraña solución: “las oscilaciones electromagnéticas sólo ocurren en 'cuántos' cuya energía E mantiene una relación definida con la frecuencia ν , dada por:

$$E = h\nu, \quad (7-6)$$

En donde h es una constante fundamental de la naturaleza conocida como la constante de Planck. El valor de esta constante es muy pequeño: aproximadamente de 6.6×10^{-34} julios/segundo.

Este concepto recibió poca atención. Fue Einstein quien, con otra propuesta insólita, revive su verdadera importancia: el campo electromagnético sólo

puede tomar valores discretos, determinados por la ecuación de Planck. La luz consistiría entonces, en oscilaciones de un campo electromagnético, como lo habían demostrado Maxwell y Hertz, y además estaría formada por partículas.

La aparente contradicción de que algo fuera a su vez onda y partícula fue demostrada experimentalmente. Según como se realice el experimento, la luz se comporta como onda o como partícula¹¹⁵. En 1923 Louis de Broglie da un golpe maestro a esta dicotomía: las partículas de materia se comportan, en ocasiones, como ondas. Dicha frecuencia se mide con la misma variable ν de Planck. Al combinarse la ecuación de Planck con la que se identifica a Einstein tendríamos:

$$h\nu = E = mc^2. \quad (7-7)$$

En la naturaleza no existe, pues, tal dicotomía. Cualquier cosa que oscile con alguna frecuencia ν puede hacerlo únicamente en unidades discretas de un valor $h\nu/c^2$. Partículas y oscilaciones de campo estarían compuestas de algo muy sutil que se manifiestan en una u otra según se observen.

Schrödinger desarrolla su importante ecuación en la cual describe el movimiento de las ondas de materia. Cuantización, incertidumbre, son las características de esta nueva física.

El descubrimiento de que la masa es una forma de energía implica que el concepto de materia ya no está más asociado a una sustancia material. Las partículas ya no son consideradas como una "cosa" básica, son haces de energía en continuo movimiento. Los átomos están compuestos de partículas, pero estas partículas no están hechas de ninguna materia. Cuando las observamos nunca veremos una sustancia, sino patrones dinámicos continuamente cambiantes, una continua danza de energía (Capra-Luisi, 2014, p.76-77).

En 1935 se plantea la paradoja EPR: Einstein, Podolsky y Rosen. Según la mecánica cuántica, dos sistemas cuánticos, bajo ciertas condiciones, puede ser descrito por una única función de onda, que incluye las probabilidades de los resultados de los experimentos que pueden realizarse en ambos sistemas bien sea individual o conjuntamente. Este tipo de descripción impide que sea posible conocer el estado del sistema global, definido por los dos sistemas interrelacionados, a partir de mediciones de cada uno de ellos (por ejemplo consideremos que cada sistema cuántico está formado por una sola partícula).

115. Remitimos al lector al numeral A.7.5 Para ampliación sobre el tema.

En un estado entrelazado, al manipular una sola partícula se afecta el sistema total. De hecho operar sobre una sola partícula, a distancia, afecta a la otra de manera instantánea. Es más. Si un observador mide por ejemplo la posición de una de las partículas, otro observador podrá conocer, aplicando el principio de incertidumbre la posición de la otra partícula, algo que no tiene un equivalente en el macromundo. Esto implicaría una transmisión de la información en forma instantánea violando el postulado fundamental de la teoría de la relatividad sobre el máximo valor posible de la velocidad de la luz como límite de la velocidad de transmisión de la información.

La conclusión era que la mecánica cuántica era incompleta. No podía explicar todos los fenómenos que en ella se presentaban.

Investigaciones posteriores concluyeron que el principio de localidad de la física tradicional implicaba que dos objetos suficientemente alejados el uno del otro no pueden interactuar sino con su entorno inmediato. Esto parece evidente para las fuerzas gravitacionales y eléctricas. Einstein supuso que era un principio universal, válido para cualquier par de elementos en el universo. Sin embargo este principio no opera para el mundo cuántico.

El otro problema era el de la medición. En la física clásica la medición es un acto independiente del observador y el resultado está perfectamente definido debido a las propiedades de lo medido. En mecánica cuántica, no. La medición, y lo que es peor aún el resultado del experimento, depende del observador. Solo se puede hablar en término de probabilidades.

Se presentan fenómenos que retan la imaginación: la luz (o el haz de electrones), será onda o partícula según lo que el observador desee observar y medir; es imposible conocer, simultáneamente, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula; una partícula puede estar simultáneamente en dos lugares diferentes; dos partículas del mismo tipo no pueden tener identidades separadas; los seres vivos pueden considerarse en una especie de estado de suspensión entre la vida y la muerte.

Existen varias escuelas que tratan de explicar estos hechos. Una de ellas, la complementariedad de Bohr puede resumirse así (Roldán *et al.*, 2004, p. 153):

Por otra parte, cuando se dice que dos conceptos son complementarios, y que por lo tanto se excluyen mutuamente, ello significa que no pueden utilizarse ambos en un mismo razonamiento. O sea que análisis, preguntas, inferencias, que involucren a uno de ellos se excluyen con análisis, pregun-

tas, inferencias, que involucren al otro. Por ello, respecto a un electrón, no puede hablarse de trayectoria, que implica la combinación mental de los conceptos de posición y momento precisos. Y por ello se resuelve la dualidad onda-partícula, puesto que los contextos experimentales que definen el uso de los conceptos de onda y partícula se excluyen mutuamente, lo que nos prohíbe la utilización de ambos conceptos en un mismo contexto experimental. No estamos enfrentados entonces a una situación que nos obligue a utilizar los dos conceptos en un mismo contexto, lo cual sería paradójico debido a la exclusión mutua lógica de los dos conceptos.

En otras palabras. Si dos teorías son opuestas y explican parcialmente un fenómeno, ambas deben ser tenidas en cuenta. Pero sólo puede ser utilizada una de ellas, en su propio contexto. Las dos son complementarias.

Esta posición requiere de aspectos filosóficos de fondo que otros físicos y filósofos no comparten.

¿Cuáles son las contribuciones de esta teoría a la T.G.S. y a la T.C.? Sigamos a Skyttner en este intento (p. 23-).

Empezando con Einstein y sus dos teorías sobre la relatividad, el mundo ya no es un determinismo estático: espacio y tiempo son inconcebibles en forma separada. Una estrella que vemos hoy, no es sino la imagen de una situación cientos de años atrás.

Por otra parte, la curvatura del espacio-tiempo causada por masas y energías contenidas en él modificó el concepto de gravedad propuesto por Newton.

Ya en concreto, la teoría cuántica dio al traste con el concepto de determinismo y causalidad. La luz, como onda y partícula obligó a reconsiderar los conceptos de la mecánica newtoniana. La causalidad ya no era posible establecerla como un principio inviolable; la identidad y la objetividad perdieron su poderío como punto central del mundo clásico de la ciencia. La investigación pasa de los objetos a las transformaciones, a los procesos, a las transiciones, a las interrelaciones.

El indeterminismo, la subjetividad, la ciencia como epistemología y no como ontología son consideraciones a tener en cuenta. Es fácil deducir de lo anterior el impacto que estas ideas, nacidas de la física que es reconocida como la ciencia fundamental, han tenido en esta nueva visión de ver el mundo.

Obviamente estas observaciones no reducen la importancia de la visión clásica de la ciencia. Es claro que en el mundo macro, la explicación dada es suficiente.

Lo que se destaca aquí es la importancia que estas consideraciones han influido en el pensamiento moderno, y en los enfoques de la T.G.S. y la T.C.

Skyttner (2005, p. 32) comenta:

Sobre la base de estas ideas del desarrollo científico y sus consecuencias para la visión del mundo de hoy, se pueden destacar algunas observaciones. La primera es que la desintegración de la física clásica inicia la disolución del arte y la moral. Los sondeos de Proust en la memoria humana, la insurrección de Picasso contra la perspectiva y la revolución musical de Schönberg en el tono, la armonía, y el ritmo es coherente con una nueva visión del mundo científico. Allí, los conceptos de tiempo y espacio han conseguido un cambio nuevo y radical. Los descubrimientos de Planck y Einstein se corresponden mejor con Freud la relación sueño-mundo que con la percepción convencional, empírica, del mundo. La reacción que existía del hombre de entonces contra el modernismo era un malestar causado por el creciente alejamiento de la zona de inteligibilidad inmediata, entre la ciencia y el arte. Hoy el arte y la literatura reflejan la fragmentación de la civilización occidental.

En cuanto al concepto de sistema se destaca que el todo determina las potencialidades de las partes y a su vez estas determinan la estructura del todo, de acuerdo con la definición de estructura que hemos adoptado en este texto. Dos formas diferentes de ver a un sistema, que son, en el lenguaje de Bohr, complementarias. Es interesante recordar el análisis de Lange al respecto.

Capra-Luisi comentan cómo las partículas subatómicas ya no son "cosas" sino interconexiones entre cosas, las cuales a su vez son interconexiones entre otras cosas y así sucesivamente. En la búsqueda cada vez más interna, no terminaremos en alguna "cosa" sino siempre en interconexiones. No podemos descomponer el mundo en las unidades más pequeñas posibles, a partir de las cuales reconstruirlo mecanicistamente. El mundo es un todo integrado. Una red de redes.

Desde esta perspectiva, un organismo o sistema viviente, es un todo integrado cuyas propiedades esenciales surgen de las interacciones y relaciones entre sus partes, pero no pueden ser deducidas de estas (2014, Capra & Luisi, p. 10).

Por su parte para la Teoría de la Complejidad varios conceptos han permeado campos diferentes. Así, el entrelazamiento y la decoherencia han sido utilizados en la visión moderna de la administración y la Sociología, como lo indicaremos en los capítulos siguientes.

7.5 Resumen

Abordamos la Teoría de la Complejidad, una teoría que tiene semejanzas y diferencias con la T.G.S. Por un lado, ambas rechazan el reduccionismo, el aislamiento y el pensamiento lineal; consideran que más importante que los objetos o elementos de un sistema, lo son sus interrelaciones; que estos sistemas son abiertos y que poseen la propiedad de la emergencia sistémica; que así como no hay una teoría general de los sistemas, tampoco la hay para la complejidad. Pero mientras que la T.G.S. se preocupa por explicar las componentes de los sistemas a partir del comportamiento del todo, la T.C. considera las interrelaciones de estos elementos como la clave para tal explicación, dejando que tales componentes tengan existencia por sí mismos. Éstos se comportan en forma egoísta e independiente de los demás pero son regidos por reglas sencillas. De cualquier forma, la complejidad surgirá de tales reglas e interrelaciones; en caso contrario el sistema se destruirá.

Las vertientes de la T.C. son múltiples: Caos, Fractales, Mecánica Cuántica, Cibernética, Computación, Teoría de la Información, Biología. Así como la T.G.S tiene como base el pensamiento sistémico, la red de redes, en la T.C. se habla del pensamiento en redes.

La Teoría del Caos se relaciona con aquellos fenómenos en los cuales una pequeña diferencia en las condiciones iniciales, se refleja en cambios considerables e impredecibles a corto y mediano plazo. Es el tipo de comportamiento que se observa en el clima, en las arritmias cardíacas, en el flujo de un río cuando encuentra obstáculos en su camino, en el comportamiento de la bolsa de valores o en la formación de embotellamientos de tráfico. Lo sorprendente es que las ecuaciones que rigen estas conductas no son aleatorias sino determinadas. Se origina, entonces, la siguiente paradoja: la existencia de sistemas determinados que son impredecibles, sin ser aleatorios. La diferencia se encuentra en el hecho de que en el Caos, el comportamiento sigue, a la larga, un patrón: el atractor extraño. En los fenómenos aleatorios no existe ningún tipo de regularidad.

La Teoría de Fractales se refiere a la matemática que resulta al repetir reglas simples de geometría una inmensa cantidad de veces. Así, surgen formas complejas que se asemejan a las observadas en la naturaleza: hojas de helecho, paisajes, redes neuronales... Cada una de estas formas se considera un atractor extraño. Es en este aspecto donde esta teoría se encuentra con la del Caos. Además tienen la extraordinaria característica de que, por ser repetición

de una misma regla, cualquier parte que se analice y amplíe, sigue el mismo patrón original: el patrón se repite incesantemente. Ya no se trata de que el todo sea igual a la suma de sus partes, o que sea mayor que dicha suma. El todo es igual a cualquiera de sus partes. La parte contiene al todo.

La Teoría de Catástrofes se refiere al estudio de las discontinuidades en la naturaleza. Fenómenos que observamos que no siguen una continuidad sino que cambian abruptamente en ciertos momentos de su comportamiento. La albúmina que se solidifica con el calor, la ruptura de los materiales sometidos a tensión o compresión, el surgimiento de períodos de tensión en un sistema social. Para su estudio, R. Thom planteó la existencia de siete tipos de “catástrofes” que permiten considerar, de manera geométrica, tales conductas. De paso, destaquemos que el uso del lenguaje geométrico es también fundamental en los Fractales y en el Caos.

Hemos hecho alusión, igualmente, a la Mecánica Cuántica. En primer lugar, al dilema onda-partícula. Se trata de fenómenos que presentan una dualidad inexplicable ya que, en principio, nada puede ser onda y partícula al mismo tiempo. En ambos casos, la energía de las partes tiende a repartirse por igual en los grados de libertad de que ellos poseen: seis, para las partículas materiales, e infinitos para los campos, que son la manifestación de las ondas. En una “combinación” de ambos, el total de la energía sería absorbida por los campos, ya que sus grados de libertad son infinitos: los electrones, en el átomo, no deberían girar alrededor del núcleo sino que deberían ser absorbidos por él.

Aquí el concepto de sistema se observa en toda su complejidad. Partículas que interactúan a distancia –fenómeno llamado entrelazamiento cuántico–, y que al alterar a una de las partículas, la otra queda inmediatamente afectada, por lo que se hace imposible estudiar el detalle del sistema; sólo es posible una observación global. El todo determina las partes, pero éstas afectan al todo en un “empaquetamiento” conceptual indisoluble. El concepto de localidad, en el mundo subatómico no concuerda con el del mundo macro.

Por otra parte, la objetividad pierde sentido. El observador condiciona el desarrollo del fenómeno observado: onda, si queremos verlo como onda, y partícula si tal es nuestro deseo.

Una interpretación de la teoría cuántica nos ofrece la manera de romper estas aparentes contradicciones: el principio de complementariedad de Bohr. Si un fenómeno tiene diversas explicaciones que se contraponen, debemos utilizar,

para cada caso particular, la teoría que lo explique. Estas teorías se complementan, no se oponen. Como veremos luego, esto ocurre en ciertas metodologías interpretativas, como la de P.B. Checkland.

CAPÍTULO 8

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD

NUEVAS PERSPECTIVAS

8.0 Las nuevas teorías

La división que hemos establecido entre el capítulo anterior y el actual, puede explicarse a partir de la diferenciación que hace Holland (2014) al subdividir el campo de la complejidad en dos subcampos: el estudio de los *sistemas físicos complejos* (SFC) y los *sistemas adaptativos complejos* (SAC). Cada uno de ellos analiza diferentes tipos de emergencia. Los SFC, las emergencias de primer y segundo tipo; matemáticamente se definen mediante el concepto de estado del sistema. Los SAC, la de tercer tipo y se definen mediante el concepto de agente.

Para Holland, los sistemas complejos físicos se centran en arreglos de elementos, tipo retículo, que se interrelacionan sólo con sus vecinos como veremos posteriormente: son los llamados *autómatas celulares*; sus elementos poseen propiedades fijas. Son clásicos los estudios sobre superconductividad, las ecuaciones de reacción/difusión de Turing (como los patrones durante la morfogénesis) y el efecto mariposa. Están muy relacionados con modelos basados en ecuaciones diferenciales parciales.

Por contraposición, los adaptativos no poseen elementos fijos. Estos elementos se conocen como *agentes*, aprenden o se adaptan como respuesta a su interacción con otros agentes. Su comportamiento es no lineal por lo que el uso de ecuaciones diferenciales parciales no es posible. No poseen un lenguaje matemático estándar para describirlos.

Aunque Holland considera como característica básica de la complejidad la emergencia sistémica, el aclara que desde la visión de la complejidad de los autómatas celulares, la definición de emergencia, como propiedad holística, no implica que esta no sea reducible a la interacción de las partes. Lo que sostiene es que "el agregado exhibe propiedades que *no* son deducibles mediante su suma. En términos matemáticos, las interacciones de interés son *no-lineales*", (2014, p. 4) Nosotros hemos dicho que no son deducible mediante el silogismo.

Esto explica que en la Teoría de la Complejidad confluyan la Teoría del Caos y de Fractales, la mecánica cuántica, la Cibernética y la Teoría de la Computación y de la Información, la Biología "virtual", el pensamiento en redes y los sistemas sociales.

En este capítulo nos ocuparemos de una visión desde la probabilidad aplicada a sistemas sociales virtuales, desde los autómatas celulares, del pensamiento en redes y específicamente de la Teoría de Grafos como herramienta matemática de la complejidad. Nos centraremos en ciertas características de los sistemas autoorganizados que muestran una extraordinaria coordinación y sincronización y, sin embargo, parecen ser fruto de elementos individuales de comportamiento aleatorio.

Consideremos la autoorganización. Esta fue explicada mediante aspectos teleológicos: una "*fuerza vital*" o "*impulso vital*" (*élan vital* del filósofo H. Bergson). Este tipo de explicación no satisfizo al pensamiento científico ya que descargaba en un aspecto metafísico la explicación de observaciones de carácter físico (orgánico) y era similar a las explicaciones dadas por Aristóteles sobre el movimiento de los cuerpos.

Una bandada de pájaros durante el vuelo posee una coordinación en sus movimientos que sugiere que "alguien" debiera estar conduciéndola. Igual ocurre con un cardumen de peces, o con la búsqueda de alimento de las hormigas. Sin embargo, no es cierto que exista un pájaro o un pez líder, ni una reina que ordene a la colonia los movimientos a seguir. Más interesante aún, las explicaciones que se han dado a estos sorprendentes sistemas autoorganizados se extienden a fenómenos tan diferentes como el tráfico de vehículos en las autopistas, a los fenómenos macroeconómicos, a las redes neuronales, ¡y a los sistemas administrativos! Hablaríamos, pues, de teleonomía en lugar de teleología.

La explicación es la misma: la autoorganización es el resultado de comportamientos individuales totalmente aleatorios. Es importante resaltar que esto sólo es posible si el número de elementos del sistema es extraordinariamente grande y existen ciertas reglas de comportamiento.

Relacionada con lo anterior está la fragmentación de los sistemas. Mitchel Resnick (2000, p. 6) comenta que por la misma época La Unión Soviética, IBM y otras grandes corporaciones comenzaron a desmembrar su sistema organizacional abandonando sus jerarquías centralizadas en beneficio de estructuras descentralizadas. De hecho, en la administración moderna hay una tendencia

hacia la descentralización. Este tipo de estructuras está siendo investigado, entre otros, por los científicos de la complejidad.

La idea no es nueva. Para sólo citar dos casos ampliamente conocidos, Adams Smith, con su mano invisible, y Darwin con su teoría de la selección natural confiaban en que los sistemas descentralizados podían autoorganizarse.

Vale la pena aquí acotar una observación que trae Diamond (2006-a, p. 520) cuando analiza la pregunta: ¿Por qué Europa y no China? en lo que respecta a la influencia de aquella, desde el punto de vista cultural y tecnológico, en el resto del planeta. Ambas regiones tuvieron ventajas geográficas, ambientales y culturales que les permitían un desarrollo que otras regiones no podían tener: fuentes alimenticias domesticables (tanto en lo animal como en lo vegetal), tecnología avanzada y el desarrollo de la escritura.

[...] Allí sugería que la razón subyacente de que Europa superara a China era más profunda que los factores un tanto más inmediatos que sugieren la mayor parte de los historiadores (por ejemplo, el confucianismo de China frente a la tradición judeocristiana de Europa, el auge de la ciencia occidental, el auge del mercantilismo y el capitalismo europeo, la deforestación de Gran Bretaña unida a sus depósitos de carbón, etc.). Frente a estos y otros factores más próximos yo recurría a una especie de “principio de óptima fragmentación”: los factores geográficos últimos que desembocaron en que China se unificara antes y que permaneciera en su mayor parte unificada a partir de entonces, mientras que Europa estuviera fragmentada siempre. La fragmentación de Europa sí favoreció los avances de la tecnología, la ciencia y el capitalismo al promover la competitividad entre estados y ofrecer a los innovadores fuentes de apoyo alternativas y puertos seguros en los que refugiarse de las persecuciones, mientras que la unidad de China no propugnaba todo lo anterior.

Más adelante señala en su libro que esta fragmentación tiene un límite óptimo, límite que La India sobrepasó y por ello no pudo tener la influencia que tuvo Europa. Como veremos luego, estas ideas han tenido su efecto en la administración empresarial.

8.1 Teoría de la “Multitud-antimultitud”

Neil Jonhson (2009, Cap. 4) y otros importantes investigadores de diferentes universidades de Estados Unidos, Europa y Asia han utilizado modelos de

computación y modelos matemáticos para explicar el porqué se presentan las multitudes (Crowd-Anticrowd Theory). Su ejemplo típico es ir a un bar (“To bar or not to bar”). Se trata de un lugar relativamente pequeño al cual van personas amantes de la buena música y buena conversación. Hay más clientes potenciales que sillas, por lo que una persona que decida ir el viernes por la noche, corre el riesgo de encontrarlo colmado. El dilema es claro. Tomarse el trabajo de vestirse convenientemente y conducir un largo camino y no encontrar un lugar libre, o llegar a casa, ponerse cómodo, pedir una buena cena y tomarse una copa de buen vino, para saber al día siguiente que la velada estuvo magnífica y quedaron sillas vacías... Esta es una situación válida para todos aquellos que deseen ir. Es un juego en el que las decisiones correctas dependen de lo que cada uno decida hacer. No existen decisiones absolutamente correctas o falsas. Todo depende de lo que todos piensen acerca de lo que es correcto o no. Si los demás deciden ir al bar, la decisión correcta es quedarse en casa y si todos decidieran quedarse en casa, lo correcto sería ir al bar. Es una competencia por recursos limitados y no todos pueden ganar.

Ahora bien, este juego no tiene una expectativa óptima. Si todos toman la misma decisión, ésta será equivocada para quienes estén cerca de sobrepasar la capacidad del bar, ya que o todos quedarán por fuera (en cuyo caso Ud. debería haber ido) o todos irían (en cuyo caso Ud. no debería haberlo hecho). El concepto económico de “expectativa (esperanza) racional” o “agente racional” falla completamente en este caso.

Supondremos que todos los clientes guardan memoria de cómo les ha ido en las últimas semanas. Aquí es donde el carácter individual entra en juego. Algunas personas creen que la última vez que ocurrió un patrón dado, este tenderá a repetirse. Creemos que la historia se repite a sí misma. Otros piensan que precisamente porque el patrón tiende a repetirse, no es probable que se repita de nuevo, ya que el juego es competitivo. Otros se encuentran en los extremos: no ir nunca o ir siempre. Pero cualquiera que sea la decisión, la situación cambiará, y como individuos, podemos modificar nuestra posición a medida que el tiempo pasa. Si un individuo mira la historia de las dos últimas semanas –ir al bar–, y observa que fueron acertadas, podrá decidir ir, si es de uno de los grupos, o no ir si pertenece al otro de acuerdo con su record individual. Este aspecto histórico podemos representarlo a través de un valor dado de probabilidad que denominaremos p . Por ejemplo, si para un individuo $p = 0.60$, entonces él cree que 6 de cada 10 veces la historia se repite, y 4 de cada 10 no, $p = 1$ significa que la historia siempre se repetirá, $p = 0$ que jamás

se repetirá y $p=0.5$ indica que está totalmente indeciso y su solución de ir o no es como si dependiera de una moneda.

¿Qué ocurre ahora si hay mucha gente? Supongamos que cada uno inicia con un valor p que considera conveniente, pero que lo modificará de acuerdo con los resultados que va obteniendo en el tiempo. La modificación del valor de p dependerá del valor de d –la diferencia neta entre el número de pérdidas (desaciertos) menos el de ganancias–. Cuando se decide cambiar p , los datos comenzarán de nuevo.

Las diferentes simulaciones con diversos valores de p y diversas estrategias arrojan un resultado extraordinario. No importa el valor asignado; la población termina dividiéndose en dos grupos: los que van y los que no van al bar. Es decir, los que creen que la historia siempre tiende a repetirse (los valores de p son cercanos a 1), y los que creen que no (los valores de p son cercanos a 0). Llamaremos a los primeros una multitud y a los otros una antimultitud. La figura 8.1 muestra cómo las poblaciones se dividen naturalmente.

Tendencia hacia una de las dos estrategias

Fig. 8.1

Esta es una propiedad emergente que es universal. Surgirá en mayor o menor grado en cualquier sistema complejo que incluya una colección de objetos que tomen decisiones, tales como personas que deben luchar por un recurso limitado. Las consecuencias de este resultado son muy importantes. De alguna manera, el sistema tiende a estabilizarse debido a que el comportamiento

“antimultitud” contrarresta (cancela) el efecto de la “multitud”. Los que no van al bar contrarrestan a los que van y el sitio mantiene una clientela estable. Si en un mercado libre los compradores igualan a los vendedores, el mercado se mantiene estable ya que la oferta y la demanda están “balanceadas”: los que están decididos a vender cancelan a los que están decididos a comprar. Se ha desvelado un efecto notable.

Aun cuando no haya comunicación entre los agentes, y siendo aún el juego competitivo, el hecho es que este “sistema social virtual” se las arregla para autoorganizarse con fluctuaciones menores a las que se observan cuando se comportan totalmente al azar, arrojando una moneda. El comportamiento global del sistema será menos fluctuante si generamos competencia entre las partes y estas reciben la misma información. Lo interesante es que esta información no necesariamente debe ser “actualizada”. El resultado final es similar si se usa un tipo de información u otra. Lo fundamental es que todos reciban la misma información. Es como si existiera una “mano invisible” que controlara al sistema. Más aún. Sólo la estabilidad es afectada si la penalidad por perder es muy superior a la recompensa por ganar ya que esto afecta continuamente al valor de p generando cambios continuos. El fenómeno “multitud-antimultitud” no es roto ni por un cambio en el valor de la “capacidad de carga” del sistema –salvo para el caso en el que esté muy cerca del valor del número de clientes–, ni por cambios en el valor de las pérdidas netas, ni si el valor de las recompensas sobrepasa por mucho al de las penalidades.

Desde el punto de vista de la ingeniería esto es muy atractivo. No se necesitan sistemas centrales que controlen a cada individuo, ni sistemas que logren que las partes colaboren entre sí. Sólo se necesita una información común, componentes individuales competitivas por el mismo recurso y ciertas reglas claras de comportamiento. Lo que importa son las relaciones entre individuos, no los individuos mismos.

Otro ejemplo de este tipo de comportamiento es el de una colonia de hormigas. Citemos un texto de Hofstadter, presentado por Pierpaolo Andriani (ver Mitleton-Kelly, 2003, p. 127):

Las hormigas individualmente son notablemente automáticas (regidas por reflejos). La mayor parte de su comportamiento puede describirse en términos de la invocación de una a una docena de reglas tales como “coja los objetos con las mandíbulas”, “siga un rastro de feromona en la dirección de un gradiente creciente”... Este repertorio aunque pequeño, es continua-

mente invocado a medida que la hormiga se mueve en su ambiente cambiante. La hormiga, individualmente, se encuentra en alto riesgo cuando encuentra situaciones que no son cubiertas por las reglas. La mayoría de ellas, las trabajadoras en particular, sobreviven cuando más unas pocas semanas antes de sucumbir a alguna situación no considerada por las reglas.

La actividad de la colonia depende completamente de las interacciones de las hormigas que la conforman. Tal agrupamiento manifiesta una flexibilidad que sobrepasa la de sus elementos individuales. Las hormigas en grupo buscan alimento, lo almacenan, enfrentan enemigos, están adaptándose a los cambios del ambiente y, lo más sorprendente, construyen una obra arquitectónica de complejidad impresionante: el hormiguero como hábitat. El rango de vida del hormiguero sobrepasa por mucho el de la hormiga en particular. En esencia, ellas presentan un conjunto de propiedades emergentes que no son observables en el individuo. Es una organización adaptativa.

La Teoría de Grafos se ha ocupado de este tipo de comportamientos.

8.2 Autómatas celulares

Estos autómatas son un valioso aporte de la Teoría de la Computación para el estudio de la complejidad iniciado por John Von Neumann hacia 1950. Sin embargo, el primer estudio serio sobre autómatas celulares se realizó en los 80 con el artículo del físico Stephen Wolfram “Statistical mechanics of celular autómata”.

No es fácil dar una definición precisa, matemática, de qué son. De manera intuitiva, se trata de una rejilla cuadriculada, como el tablero de un ajedrez, pero infinitamente extendido. También pueden ser en tres dimensiones, con características similares. A las cuadrículas se las denomina células. Cada célula puede tomar valores que generalmente se asocian a números enteros.

Para utilizarlos en un computador, la infinitud de la cuadrícula se simula considerando que existe una frontera en la rejilla y los bordes de las fronteras opuestas se doblan hasta encontrarse, de tal manera que una célula que esté en el extremo derecho del retículo hará contacto con la célula exactamente opuesta a ella en el extremo izquierdo. Igual ocurre con los bordes superior e inferior de dicha rejilla. La figura resultante es un toroide generado por un círculo.

Cada célula tiene ocho vecinos. Según lo que se desee simular, las células reciben información de sus vecinas, aunque también la pueden recibir de células alejadas¹¹⁶.

Apoyándonos en Joel L. Schiff (2008), indicaremos que lo interesante de este tipo de metodología se debe a que su sencillez no deja vislumbrar, en principio, su complejidad potencial. Reglas locales sencillas gobiernan un grupo de células que actualizan sus estados a intervalos discretos de tiempo. Como la mayoría de los fenómenos naturales tienen comportamientos locales (moléculas, células, hormigas), individuos que interactúan con sus vecinos o, en otras palabras, sociedades –como lo vimos en el numeral anterior–, el uso de estos autómatas es una manera muy conveniente para estudiarlos y esto, pese a que siendo continuos, se pueden simular mediante matemática discreta.

Los autómatas celulares pueden autoorganizarse. ¿Cómo lo hacen? A través de reglas locales sencillas que, en principio, no tienen nada que ver con el comportamiento global organizado.

Nociones de fractales, dimensión, información, entropía se destacan en este tipo de estudio. Sin pretender decir que ésta sea la panacea para la comprensión de la complejidad, sí es, sin duda, una excelente herramienta.

Citemos a Francesco C. Billari et al. (2006):

En los modelos de autómatas celulares, los agentes se comportan como insectos en un paisaje virtual. Para un número grande de estos agentes homogéneos, es posible aplicar métodos de la física estadística, de la dinámica no-lineal y de la Ciencia de la Complejidad que describen la autoorganización o las transiciones de fase observándose que emergen propiedades macroscópicas del comportamiento y de las interacciones de los agentes componentes. Estos fenómenos colectivos se han transferido a campos interdisciplinarios tales como la socio-física, y la econo-física, con aplicaciones que van desde sistemas de multitud y de tráfico, a sistemas urbanos, demográficos y de planificación ambiental (p. 3).

Uno de los autómatas celulares más conocidos es el “juego de la vida” de Conway. En este juego, las células están vivas o muertas. Si una célula está viva, se representa por un cuadrado de color negro; si está muerta, por uno blanco o simplemente transparente.

116. Esta es una opción. Existe otra manera de definir el vecindario: sólo las células norte, sur, este y oeste para cada célula.

El juego puede poseer reglas diferentes. Las reglas clásicas son las siguientes:

- Si una celda viva, está rodeada de dos o tres células vivas, esta célula sobrevivirá en la siguiente iteración.
- Si una célula viva está rodeada menos de tres o más de tres células vivas, esta morirá.
- Si una célula muerta está rodeada por tres, y sólo tres células vivas, la célula muerta será reemplazada por una viva.

Estas reglas se aplican en tiempos discretos. El equivalente a una iteración en los cálculos del sistema.

La figura 8.2 muestra el caso de cinco células vivas.

Dos iteraciones aplicando las reglas arriba indicadas

Fig. 8.2

En el instante t , la número 1 está rodeada por sólo una célula viva, por lo que en la siguiente iteración, morirá; la célula 2 está rodeada de dos vivas, por lo que en la iteración siguiente también morirá; la 3 está rodeada de cuatro vivas, por lo que morirá; la 4 lo está por tres, luego sobrevivirá. La 5 está rodeada de dos vivas, por lo tanto no persistirá. La célula entre 1 y 2, adquirirá vida. La célula muerta, rodeada por las 3, 4 y 5, adquirirá vida igual que la que está a la derecha de la número 4. Las reglas se aplican simultáneamente. Por lo tanto el resultado en el momento $t+1$ y de acuerdo con las reglas indicadas es el esquema que aparece al lado derecho de la figura 8.2. Existe software de disposición libre en la red que facilita la simulación.

Este juego posee una estructura lógica capaz de generar una complejidad similar a la de los organismos vivos. De ahí su importancia y transcendencia.

Otro autómata celular muy interesante es el de los “Boids” (bird-oid object: objeto “pajaroide”) de Craigh Reynolds.

Refiriéndose a las redes sociales, Billari *et al.* Comentan:

La dinámica de estas redes sociales es un proceso indeterminado, casi aleatorio. Con un autómata celular este comportamiento puede ser desarrollado así: se sitúan los actores en la cuadrícula y se les da ciertas reglas sobre cuándo y hacia dónde moverse, lo cual permite que un proceso autoorganizado evolucione de tal manera que los actores de cierto tipo (aquellos que tienen dotaciones similares) tiendan a agruparse (P. 29).

El lenguaje de programación Netlogo es un lenguaje especialmente diseñado para desarrollar modelos complejos con estos autómatas. También es de libre disposición.

8.3 Teoría de Grafos

En el pensamiento en redes, el foco de atención se centra en las relaciones de las entidades, más que en las entidades mismas.

Desde el punto de vista de la red, la complejidad de un sistema parece surgir de la complejidad de las interacciones de sus partes. Como hace notar M. Mitchel (Op. Cit. pg. 250), el número de genes que posee el ser humano y las plantas de mostaza son aproximadamente iguales: unos 25.000. Sin embargo, estos dos seres vivientes tienen comportamientos asombrosamente diferentes.

Esta autora cita varios ejemplos en los cuales este tipo de enfoque de la complejidad empieza a dar interesantes resultados:

- ¿Por qué el lapso de vida de un organismo es función de su tamaño?
- ¿Por qué los rumores, chistes y “mitos urbanos” se extienden tan rápidamente?
- ¿Por qué sistemas grandes, complejos, tales como las redes de potencia eléctrica y el internet son tan fuertes en algunas circunstancias y tan susceptibles a grandes fallas en otras?

- ¿Qué tipos de eventos pueden causar que una comunidad ecológica estable pueda, de pronto, desmoronarse?

Desde el punto de vista matemático el concepto de red se estudia mediante la teoría de grafos¹¹⁷. Un grafo es un par ordenado $G = (V, E)$ en donde:

- V es un conjunto de vértices o nodos, generalmente finito y
- E es un conjunto de aristas o arcos que relacionan o conectan estos nodos. Un enlace e_{ij} conecta los vértices v_i y v_j . La vecindad de vértices N para un vértice v_i se define como:

$$N_i = \{ v_j \}: e_{ij} \in E \vee e_{ji} \in E.$$

Un grafo no dirigido es un grafo en el cual sus aristas no tienen una dirección específica, es decir, conecta en ambas direcciones. Un grafo dirigido posee aristas que conectan a dos nodos en una dirección determinada. La figura 8.3 ilustra ambos tipos de grafos.

Fig. 8.3

El grado k_i de un vértice i es el número de vértices enlazados con él (número de aristas incidentes al vértice): $k_i = |N_i|$.

Un grafo es conexo si existe al menos un camino entre cada par de nodos. Se entiende por camino una sucesión de aristas, en la cual la arista siguiente tiene su origen en el nodo final de la arista que la precede.

Grafos regulares: es aquel en el cual todos los nodos tiene el mismo grado.

Para fijar ideas, consideremos el siguiente grafo no dirigido (ver figura 8.4).

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}; E = \{1-2, 1-3, 2-4, 2-5, 4-6, 5-6\}; e_{24}; 2-4.$$

$$N_2 = \{ v_1, v_4, v_5 \}, N_6 = \{ v_4, v_5 \}; k_1 = k_2 = \dots k_6 = k = 2.$$

117. Ideas extractadas de Watts Duncan, 1999, y de Yufeng Wang and Jianhua Ma, 2014.

Grafo no dirigido de 6 nodos y 7 aristas

Fig. 8.4

Caminos de v_1 a v_6 : 1-2-5-6, 1-2-6, 1-2-4-6, 1-3-4-6, 1-3-4-2-5-6.

Este grafo es conexo. Se puede ir de cualquier nodo a cualquier otro nodo.

El total de conexiones entre n nodos de un grafo no dirigido es $n(n-1)/2$.

La longitud de un camino es el número de aristas que contiene.

La distancia entre dos nodos v_i, v_j ($d(v_i, v_j)$) es la longitud del camino menor que une a ambos nodos. Si no existe un camino entre ambos nodos su distancia es infinita.

En la gráfica 8.4 tenemos que la longitud del camino 1-2-5-6 es de 3 y la del camino 1-3-4-2-5-6 es de 5. La distancia entre los nodos 1 y 6 es: $d(1,6) = 3$.

El diámetro G de un grafo se define como:

$$diam\ G = \max_{v_i, v_j} d(v_i, v_j) \quad (8.1)$$

En otras palabras, es la mayor distancia entre dos nodos del grafo. En la figura 8.4 el diámetro del grafo es igual a 5.

Se denomina longitud del camino característico de una red regular, L , al promedio de todas las distancias que posee dicha red. En otras palabras L es el número de aristas en la ruta más corta entre dos nodos, promediada con respecto a todos los pares de nodos.

Para el caso de la figura 8.4 tendremos:

$L = [(1 + 1 + 2 + 2 + 2)_1 + (1 + 2 + 1 + 1 + 1)_2 + (1 + 2 + 1 + 3 + 2)_3 + (2 + 1 + 1 + 2 + 1)_4 + (2 + 1 + 3 + 2 + 1)_5 + (2 + 1 + 2 + 1 + 1)_6] = 46/(5 \times 5) = 1.84$ (Cfr. fig. A.8.1 para un ejemplo en detalle).

Los subíndices indican los cálculos de cada nodo. Para el nodo 1 los datos de las distancias son: 1-2: 1, 1-3: 1, 1-4: 2, 1-5: 2, 1-6: 2.

El coeficiente de agrupamiento (C_i) de un nodo v_i , mide cuántos nodos de los relacionados con él están relacionados entre sí. Se define como el cociente del número de aristas actuales entre vecinos dividido por el total de aristas posibles entre tales vecinos. C_i refleja cuántos de los amigos de v_i son amigos entre sí. En otras palabras C_i mide el grado de “camaradería” de un círculo típico de amigos. El promedio de tales valores da el grado de agrupamiento del grafo.

En el grafo 8.4 tenemos que $C_1 = 0$ ya que su dos nodos vecinos 2 y 3 no están conectados entre sí. $C_4 = 0$ ya que de sus tres nodos vecinos (3, 2, 6) tampoco están conectados entre sí.

En los grafos dirigidos se diferencia entre grado de entrada (g_-) y grado de salida (g_+), según el número de aristas que entren o salgan del mismo.

A las comunidades que son resultado de interacciones fuertes entre sí se les llama grupos (clusters). Los nodos de grado alto se denominan *hubs*.

Un grafo aleatorio es aquel en el cual los nodos se conectan por aristas que tienen una probabilidad p de ser conectados.

Definida inicialmente como una distribución binomial al número de aristas, cuando el grafo crece en el número de nodos, la probabilidad de que un vértice tenga un grado k sigue una ley de Poisson (Erdős):

$$p_k = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \approx \frac{z^k e^{-z}}{k!} \quad (8.2)$$

El coeficiente de agrupamiento de un grafo aleatorio es:

$$C_{\text{aleatorio}} = p = \kappa/n, \kappa = pn \quad (8.3)$$

Las redes del mundo real (redes neuronales, redes sociales, la webb...) tienden a poseer un valor de C correspondiente a una red regular, pero el valor de L es similar a la del aleatorio.

Una propiedad de ciertas redes es la distribución de sus grados. Si se grafica el número de nodos contra su grado (o un rango dado), el resultado es una gráfica en la cual el número de nodos con pocos grados es mayor que el número de nodos con mayor grado. La figura 8.5 ilustra la idea general.

Distribución de los grados de una red con respecto al número de nodos que ella tiene

Fig. 8.5

Como puede verse, hay muchos nodos con pocos grados y pocos nodos con grados altos. Así, en la red (internet), hay muy pocos sitios Web populares que reúnan muchos otros sitios de la red (como lo es Google) y muchos con pocos grados, “Web sites” que nunca hemos oído nombrar. Es evidente que un gráfico como el indicado no puede ser fruto del azar. En caso tal, trataría de presentar una distribución uniforme entre “grado” y “número de nodos”. Este ha sido uno de los descubrimientos más importantes de la ciencia de las redes (Network Science). La gran mayoría de las redes naturales, sociales y tecnológicas que están siendo estudiadas siguen este patrón. El porqué esto es así es el gran reto de este nuevo campo de estudio. Es la fragmentación, a la que hicimos referencia anteriormente. Nótese que aunque los individuos tienen objetivos propios, estos no afectan el comportamiento general aquí subrayado. Esta es una importante ley de la complejidad: la ley $1/f$, ley del ruido o ley de la potencia.

8.3.1 La ley $1/f^n$

Tomaremos algunas ideas de Gribbin (2007). ¿Con qué frecuencia se producen terremotos de diferentes magnitudes? Muchos creen que después de un terremoto de alta magnitud, sólo podrán presentarse terremotos de menor magnitud, ya que aquél libera tanta energía que el próximo terremoto que le siga tendrá poca energía para liberar (ha transcurrido poco tiempo de acumulación de energía). Las primeras personas que realizaron un estudio estadístico de la frecuencia de los terremotos y sus intensidades fueron Charles Richter (1900-1985) y Beno Gutenberg (1889-1960) quienes crearon la escala que se conoce como la Escala Richter. Esta escala es logarítmica. Un aumento de una unidad en la escala corresponde a un aumento de la cantidad de energía liberada de un orden de 30 veces. Un terremoto de magnitud 2 es 30 veces más potente que uno de magnitud 1, y uno de magnitud 3, es 30 veces más potente que uno de magnitud 2 y, por lo tanto, 900 veces más que uno de magnitud 1. En un gráfico determinaron el número de terremotos que se habían presentado, de acuerdo a su magnitud, en el rango [5; 5.5), luego en el rango [5.5; 6.0) y así sucesivamente. La tabla de la figura 8.6 fue adaptada de una publicada en Wikipedia.

Magnitud Richter	Frecuencia/año	Magnitud intermedia
[1-2)	2.880.000	1,5
[2-3,0)	360.000	2,5
[3,0-4,0)	49.000	3,5
[4,0-5,0)	6.200	4,5
[5,0-6,0)	800	5,5
[6,0-7,0)	120	6,5
[7,0-8,0)	18	7,5
[8,0-9,0)	1	8,5
[9,0-10)	0,05	9,5

Terremotos y su frecuencia

Figura 8.6

En la figura 8.7 se indica la gráfica correspondiente a la frecuencia de los terremotos (eje vertical) y la magnitud de cada intervalo de frecuencia (eje horizontal). Sigue el patrón de la figura 8.5.

Terremotos: magnitud y frecuencia. Ley exponencial

Fig. 8.7

Cuando estos datos se expresan en una gráfica *log-log*, se tiende a una línea recta. En términos matemáticos, la probabilidad de que un terremoto tenga una magnitud M es proporcional a $1/M^n$ (ver figura 8.8). Ocurren mucho más terremotos de pequeña magnitud, que terremotos de gran magnitud.

Esto explica la resiliencia de las redes del tipo que estamos estudiando: dado que son muchos más los nodos que son de grado bajo, la probabilidad de que ocurra un daño en estos nodos es mucho mayor que la probabilidad de que ocurra en nodos de alto nivel de agrupamiento.

Otra característica importante es la siguiente: si se analizan los terremotos en una parte de este rango, por ejemplo, en el rango $[5; 5.5)$ y se hacen varias subdivisiones, las frecuencias y sus magnitudes respectivas siguen la misma ley. Esto es lo que se conoce como la propiedad de *invariancia en la escala* (*scale free*). En otras palabras, es un fenómeno fractal. También los fractales son independientes de la escala. Así, las líneas costeras estudiadas bajo la teoría

Tendencia lineal del gráfico *log.-log.*

Fig. 8.8

de los fractales son de escala invariante. Esto significa, desde el punto de vista de los terremotos, que en la práctica no hay diferencias esenciales entre un gran terremoto y otro pequeño, salvo por su intensidad. Dicho de otra forma, tanto los terremotos grandes como los pequeños se producen aleatoriamente, pero *con frecuencias diferentes*.

Existe la misma probabilidad de que, en cualquier momento, se presente un terremoto grande o uno pequeño y no depende de la magnitud del terremoto que lo haya precedido.

En esencia esta ley nos dice que la frecuencia con que ocurre cierto tipo de sucesos es proporcional al inverso de una potencia de su magnitud. Otra forma de expresarla es decir que la magnitud de un acontecimiento es proporcional al inverso de alguna potencia de su frecuencia. Esto es lo que se conoce como la ley de "ruido 1 por f^n ", y se escribe $1/f^n$. La potencia puede variar de un caso a otro, pero la ley es bastante general. Decir que un fenómeno se comporta según una ley de potencia y decir que sigue la ley de ruido $1/f$, son dos afirmaciones sinónimas. Su nombre viene de los ruidos que afectan aleatoriamente una señal eléctrica dificultando su medida.

Cuando una señal no deseada se superpone a una señal que consideramos útil, denominamos *ruido* a la primera señal. Por lo tanto, decidir qué es ruido es un asunto subjetivo. Lo que puede ser ruido para alguien puede ser una señal útil

para otro. Los ruidos se asimilan a “parpadeos” en la señal que pueden ser de pulsaciones muy rápidas o muy lentas. Cuando estos parpadeos se representan en un gráfico en el cual el eje x es el tiempo, la gráfica es del tipo de “dientes de sierra” típica de un fenómeno aleatorio (ver figura 8.9).

Comportamiento aleatorio

Fig. 8.9

Según esta ley exponencial, con respecto a su repetibilidad podemos decir que por cada 1.000 terremotos de magnitud 4 hay aproximadamente 100 de magnitud 5, 10 de magnitud 6 y así sucesivamente.

El ruido completamente aleatorio se denomina *ruido blanco*. En este caso decimos que no existe ningún patrón en su repetibilidad. El caso extremo es una señal con una sola frecuencia. Si pensamos en términos de sonidos, estos dos extremos son poco agradables al oído: una "melodía", mezcla de sonidos sin ningún patrón (un gran ruido), o una melodía monótona. Entre ellos existen varias opciones las cuales reciben una denominación basada en colores. El ruido rosa es uno bastante agradable a nuestro oído: es un ruido $1/f^2$. El sonido de la música tiene esta estructura así como el de las palabras habladas.

Aunque se observa una tendencia a exagerar la aplicabilidad de esta ley, existen varios campos del saber, aparte de los ya citados, en donde se ha encontrado que esta estructura existe:

- La evolución de los seres vivos en nuestro planeta, y particularmente la extinción de especies, seguiría esta ley. La evolución toma su tiempo pero los registros fósiles muestran cambios fuertes en lapsos de tiempo relativamente cortos.
- El tamaño de las ciudades en cuanto al número de sus habitantes.
- El ingreso económico de las personas, inicialmente estudiado por Pareto.
- Los fuegos forestales.
- Todos los fenómenos descritos por la teoría de los fractales.

8.3.2 Las ideas de Kauffman

Los primeros estudios de Kauffman están relacionados con lo que podríamos denominar “El juego de los botones”. Imaginémos un gran número de botones repartidos en el suelo sin ninguna relación entre sí. Tomemos ahora dos botones cualesquiera al azar y unámoslos mediante un hilo. Repitamos esta operación muchas veces. Al principio la mayoría de los botones estarán sin ninguna conexión y unos cuantos sí. Si encontramos que el hilo que ha sido atado a un botón, también lo está a otro que hemos escogido aleatoriamente, busquemos otro al azar y los conectamos. El botón puede atarse a sí mismo (Kauffman, 1995).

Para explicar este experimento supongamos que tenemos 20 botones numerados para su identificación. Podemos, con números aleatorios entre 1 y 20 empezar a realizar las conexiones. Llamaremos “bordes” a los hilos que unen los botones dos a dos, y “nodos” a los botones. En cada iteración (creación de una conexión entre dos nodos) se calcula la relación Bordes/Nodos. El grado de complejidad del sistema se mide por el número de “racimos” que se forman. Un racimo es simplemente el conjunto de botones que resulta cuando tomamos un hilo y halamos hacia arriba. El grado de complejidad será el número de botones del racimo más grande. Es evidente que el tamaño del racimo más grande crece lentamente y es aproximadamente lineal. Si la red tiene muchos botones, al principio hay muy poca oportunidad que una nueva conexión entre dos botones añada botones al racimo más grande. Pero algo extraordinario sucede. Cuando el número de hilos se acerca y sobrepasa la mitad del número total de botones, el tamaño del racimo más grande aumenta exponencialmente.

Racimos más pequeños son conectados al racimo mayor. Rápidamente se forma un racimo único de tamaño extraordinario. Pero en muy corto tiempo (pocas iteraciones después) la tasa de crecimiento del racimo decrece sensiblemente. El sistema llega a un tope en su complejidad. Pasa de un estado monótono (muchos botones, pocas conexiones entre ellos) a un estado más estructurado pero con poca posibilidad de cambio. Se habla de una *transición de fases*. La pendiente de esta transición depende del número de botones: a mayor número, más empinada es la pendiente, más abrupta es la transición de fases. La gráfica de la figura 8.10 explica el proceso descrito.

Tendencia del sistema a un límite de complejidad

Fig. 8.10

La complejidad resulta de un sistema muy sencillo con pocas reglas simples y con interacciones regidas por el azar.

Con este modelo Kauffman trataba de responder a la gran pregunta: ¿Cómo es que la vida puede surgir de la materia inanimada? Él relacionó este estudio con los procesos catalíticos que tienen lugar en la reacción *BZ* (Belousov-Zhabotinsky).

En un apretado resumen, se trata de reacciones químicas que en lugar de tender a un estado de equilibrio, se mantienen en ciclos repetitivos entre dos estados diferentes, violando, aparentemente, la segunda ley de la termodinámica. El sistema se autoorganiza. Se puede imaginar que una sustancia química *A* ca-

taliza la formación de otra sustancia química *B* que también es catalítica. A su vez esta sustancia fomenta la formación de *D* y así sucesivamente.

Si en este caldo primordial hay una gran variedad de tales sustancias puede ocurrir que conectándose al azar, una de las sustancias formadas catalice la formación de *A* creándose un lazo de retroalimentación que genera más producción de sustancias. También podría ocurrir que una misma sustancia catalice la formación de más de una. La energía extra para tales procesos la puede suministrar la energía del sol o las chimeneas volcánicas. Kauffman dice que de esta forma es como surge la vida: transiciones de fase en un sistema químico con suficientes conexiones. Lo notorio es que el surgimiento es un asunto de todo o nada. Si hay suficientes conexiones, la vida será inevitable; en caso contrario no habrá tal posibilidad. No hay estados intermedios. Evidentemente es una conjetura que de hecho ha sido discutida a favor y en contra. Citemos a Kauffman (*Op. Cit.* p. 31):

La intuición que deseo que Uds. tengan de este juego es sencilla: a medida que la relación hilos sobre botones crece, repentinamente el número de botones conectados es tan grande que se forma una enorme telaraña de botones. Esta componente gigantesca no es misteriosa: emerge naturalmente como una propiedad de una red aleatoria. La analogía con la teoría del origen de la vida se da cuando un gran número de reacciones son catalizadas en un sistema de reacciones químicas y una enorme red de reacciones catalíticas repentinamente cristaliza. Tal red, a su turno, es seguramente autocatalítica y casi con certeza, auto-sostenida, viva”.

Autocatalítico significa que en un conjunto de moléculas que interactúan como catalizadores para generar reacciones químicas, algunas de ellas pueden que desempeñen un papel dual: el de catalizador y el de un producto de las reacciones que genera dicho catalizador.

Para comprender un poco más las ideas aquí expresadas, Maturana y Varela (2003, p. 28-) indican que sólo aquellas moléculas que pudieran generar membranas “estables y plásticas” que permitieran separarse del ambiente que las rodeaba y que a su vez permitieran cierta interrelación con el mismo mediante el transporte de iones de sodio y calcio, serían las únicas capaces de generar el fenómeno de la vida. Tal es el caso de las proteínas. Gracias a estas membranas las moléculas pudieron reproducirse a sí mismas mediante redes de reacciones: se crea una *organización autopoietica*. Podríamos decir que estas células son

un sistema cerrado desde el punto de vista de la organización, pero abierto con respecto a la energía. Maturana llama a esto la *clausura operativa*.

En cuanto a los aspectos genéticos, especialmente el surgimiento del orden, Kauffman ha experimentado con las llamadas redes aleatorias booleanas (Random Boolean Networks) que son una extensión de los autómatas celulares. Tales redes constan de un conjunto de nodos y conexiones entre ellos. En cada intervalo de tiempo dado (el tiempo se considera discreto, dividido en intervalos iguales) la red se actualiza: cada nodo se encuentra en uno, y sólo uno de dos estados: “prendido” (on) o “apagado” (off) (de allí la denominación de red booleana, es decir, red binaria formada sólo por ceros y unos). Los nodos se conectan entre sí en forma aleatoria. Puede o no ocurrir, que si un nodo A se conecta con B , este a su vez se conecte con A .

El *grado* de un nodo de un grafo dirigido se define como el número de conexiones que le llegan, tanto de otros nodos como de sí mismo. Si este número es igual para cualquier nodo de la red le daremos el valor K .

La red se construye de la siguiente manera: para cada nodo se crean conexiones de K grados de entrada a partir de otros nodos, incluso consigo mismo, en forma aleatoria, y se crea una regla. Los estados iniciales “0”, “1” se definen al azar. En el instante siguiente, cada nodo transmite a los demás el estado en que se encuentra, y se aplica la regla escogida para cada uno. Él también estará influido por los estados de los otros nodos (ver parte izquierda de la figura 8.11 para $t=0$). Esta red es del tipo $K=2$.

Red aleatoria booleana con cinco nodos. $K=2$

Fig. 8.11

Realicemos una pequeña simulación con este ejemplo.

Indicaremos por “Apagado” el valor “0” y el círculo aparecerá con relleno de color gris. El valor de “1” significará que el nodo está “encendido” (nodo sin relleno). La regla para el comportamiento en el instante siguiente depende de los estados de los dos nodos que la afectan.

Para nuestro ejemplo tenemos la tabla de la figura 8.12. Por ejemplo, en el nodo 1, si ambas entradas están apagadas, el nodo se encenderá en el instante siguiente; de lo contrario, se apagará. En el nodo 2, si ambas entradas están encendidas, en el instante siguiente el nodo deberá estar apagado; de lo contrario se encenderá. En el nodo 3, si una de las entradas está encendida y la otra apagada, pero no ambas, el nodo se apagará; en cualquier otro caso el nodo deberá estar encendido. En el nodo 4, si por lo menos una de las entradas está encendida, el nodo se apagará; de lo contrario se encenderá. Para el nodo 5 éste se encenderá si ambas entradas están apagadas; de lo contrario, deberá estar apagado. Con estas reglas el estado del sistema en el instante siguiente ($t = 1$) es el que aparece a la derecha de la figura 8.11.

Nodo	Entrada	Entrada	Estado del nodo
1	0	0	1
2	1	1	0
3	1 0	0 1	0
4	1 0 1	0 1 1	0
5	0	0	1

Reglas de interrelación entre los nodos

Fig. 8.12

Es interesante resaltar que en este autómatas celular las reglas pueden ser diferentes para cada nodo (célula) a diferencia de “El juego de la vida”. Por otra parte, en “El juego de la vida” la influencia es de los nodos vecinos; en Kauffman, de los nodos conectados.

Este investigador y su equipo comenzaron a “experimentar” con este tipo de redes dando valores diferentes al parámetro K y considerando diferente número de nodos. Se observó que las redes podían tender a un estado único, a estados oscilatorios (se repetía un patrón en ciclos constantes de tiempo) o terminarían en caos. Kauffman comenta (*Op. Cit.* p. 44):

La mayoría de las redes Boleanas son caóticas, faltas de gracia ante pequeñas mutaciones. Incluso redes con pocos N y $K = 4$ o $K = 5$, muestran comportamientos impredecibles, caóticos, similares a los observados en redes $K = N$.

¿Dónde comienza el orden? El orden surge repentina y sorpresivamente en redes $K = 2$. Para estas redes formales, la longitud de los ciclos no es la raíz cuadrada del número de estados sino, en forma aproximada, la raíz cuadrada del número de variables binarias. Hagamos una pausa e interpretemos esto lo más claramente posible. Imaginémonos una red Boleana aleatoria con $N = 100.000$ bombillas, cada una con $K = 2$ entradas. El “diagrama del alambrado” sería una red impenetrable. A cada bombilla se le ha asignado una función Boleana aleatoria. La lógica, por lo tanto, será igualmente un inmenso enredo. El sistema tiene $2^{100.000}$ o $10^{30.000}$ –megaparsecs de posibilidades– ¿y qué ocurre? Esta inmensa red se asienta y cicla alrededor de la raíz cuadrada de 100.000 estados: solamente 317.

Espero que esto les mueva la silla. Yo no me he recuperado desde que lo descubrí hace tres décadas. Aquí tenemos, y perdónenme, un orden pasmoso. A una millonésima de segundo por transición de estado, una red, ensamblada aleatoriamente, sin ninguna guía inteligente, efectuará ciclos a través de su atractor en una 317-millonésima de segundo. Esto es muchísimo menos que billones de veces la historia del universo. Para considerar esto desde otra perspectiva, podríamos preguntarnos qué tan pequeña es la fracción a la que se reduce el espacio de estado de la red. Simplemente 317 estados comparados con el total de estados. Una pequeñísima proporción, ¡aproximadamente 1 dividido por 10^{29998} !

En estas redes pequeñas alteraciones no producen grandes cambios pero sí pueden generar cambios moderados. Ellas no son *muy* ordenadas. Tampoco están “congeladas” como en el caso $K = 1$. Ellas pueden tener comportamientos complejos.

Existen maneras para lograr que redes con K mayores que 2 puedan mostrar orden. El lector interesado podrá consultar a fondo la bibliografía indicada.

Uno de los resultados importantes de este tipo de investigación es el hecho de que en redes de muchos elementos existen *atajos*, interconexiones entre elementos muy distantes que reducen sensiblemente la complejidad de la interconexión permitiendo que toda la red esté prácticamente comunicada con un número relativamente poco de interconexiones. De esta manera, redes altamente complejas pueden comprenderse como si fueran “mundos pequeños” (Small Worlds).

Muchos de los modelos citados, y otros de los que siguen, pueden ser simulados utilizando NetLogo.

8.3.3 Mundos pequeños (Small Worlds)

De alguna manera todos hemos tenido la experiencia de conocer a alguien que se encuentra lejos de nosotros y que ha sido mencionado por una persona con la cual estamos hablando. Ante esta coincidencia, es común escuchar la frase: “el mundo es un pañuelo”. ¿Será una simple coincidencia o habrá detrás de estas situaciones algo profundo, inherente a las relaciones humanas en nuestro planeta? Haremos que Mark Buchanan (2002), nos lleve por este interesante mundo.

En 1950, un psicólogo de la Universidad de Harvard, Stanley Milgram, quiso responder a esta pregunta tratando de determinar cuántas conexiones (conocidos entre sí, dos a dos) serían necesarias para relacionar dos personas cualesquiera en los Estados Unidos. El primer experimento de Milgram se llevó a cabo entre Kansas y Nebraska: se trataba de hacer llegar una carta dirigida a alguien desconocido por el remitente, uno de ellos escogido en Omaha o Wichita, y el otro en Boston, pero sólo a través de intermediarios conocidos entre sí. El resultado fue absolutamente sorprendente: el número promedio de intermediarios entre dos personas que debían contactarse (y que no se conocían entre sí) fue de 5. La regla surgió rápidamente: las personas, en el planeta, están unidas por “seis grados de separación”. Experimentos posteriores demostraron que en el estudio de Milgram había elementos que no fueron tomados en cuenta; estaba sesgado. Así, muchas de las cartas enviadas inicialmente no fueron recibidas por la persona objetivo (en uno de los primeros experimentos 236 de 292 cartas fueron interrumpidas durante el proceso) y en otros experimentos, el número de intermediarios fue superior a cinco. Pero la

regla se ha convertido en parte de nuestra cultura urbana. Es la que distingue a las llamadas redes sociales. Un análisis más detallado sobre el experimento puede leerse en J. Kleinfeld (2002).

Dos investigadores, Duncan Watts estudiante en aquel entonces y Steve Strogatz su tutor de doctorado de Cornell University, habían estado estudiando cierto tipo de comportamientos que podría ser descrito mediante la teoría de grafos. En los últimos años (1990-) físicos, biólogos y otros hombres de ciencia habían encontrado conexiones inesperadas entre aspectos del comportamiento humano con otros fenómenos similares que no tienen ninguna relación aparente con ellos: de la célula viviente a los ecosistemas; de la internet al cerebro humano. ¿Somos, acaso, robots predeterminados de leyes matemáticas? ¿Habríamos perdido nuestra libertad, nuestro libre albedrío? Lo que ocurre es que muchas complejidades inherentes a las sociedades humanas tienen poco que ver con la compleja psicología de los humanos; de hecho, muchos patrones similares se observan en otros fenómenos que no tiene nada que ver con la posesión de consciencia.

En un laborioso proceso investigativo que reúne a científicos como Hyugens, Erdős, Granovetter entre otros, Watts y Strogatz desarrollaron un tipo de grafo que se caracterizaba por ser altamente interconectado pero que a su vez presentaba ciertos aspectos aleatorios: estaban entre el orden y el azar.

Uno de los problemas más retadores de la teoría de grafos es el siguiente: ¿Cómo conectar todos los puntos de un grafo de tal manera que queden completamente conectados utilizando el menor número de conexiones? Es un problema importante. ¿Cómo establecer una ruta de ventas en diferentes ciudades, con el menor recorrido posible, y que las cubra a todas? O ¿cuál es la distribución de tubos-madre del acueducto de una ciudad, para que todas las casas queden con servicio de agua potable, al menor costo posible?

Para el caso de seis mil millones de habitantes del planeta (6×10^9) conectados al azar, según lo que indicamos en el numeral 8.2, Erdős nos dice que si esta red aleatoria tiene un número de aristas $> 6 \times 10^9 / \ln(6 \times 10^9) = 266.488.708$, el grafo será conexo, número inmensamente inferior al total de aristas posibles: $(6 \times 10^9)^2 / 2$.

Por otra parte, los grafos ordenados permiten llegar de un nodo a cualquier otro. El asunto es que toman caminos largos para ciertos nodos, alejados entre sí. Los grafos totalmente aleatorios, como acabamos de ver, permiten atajos

que minimizan tales recorridos, pero les toma un tiempo estar altamente interconectados.

Si dibujamos los seis mil millones de habitantes del planeta con seis mil millones de puntos en una hoja de papel suficientemente grande, y escogemos un punto para comenzar, conectando este punto con otros 50 diferentes, y a su vez cada uno de estos con otros 50 puntos, rápidamente vemos que, al cabo de seis operaciones de estas habremos conectados $50 \times 50 \times 50 \times 50 \times 50 \times 50 = 15.625.000.000$ puntos (habitantes): ¡el doble de la población mundial! Podríamos decir, entonces, que el misterio está resuelto. Pero la situación real no es tan sencilla.

En las redes sociales, éstas presentan una característica: la formación de grupos de personas que se conocen entre sí (relaciones familiares, de amistad o un simple “hola” cotidiano). Si la red social fuera completamente de este tipo, llegar a sitios lejanos mediante intermediarios conocidos tardaría mucho más que los seis grados que halló Milgram. De hecho, si cada uno de nosotros tuviera 50 conocidos y volviéramos a nuestra hoja, conectaríamos cada nodo, con 50 nodos vecinos. Ahora la estructura es ordenada y por lo tanto alcanzar un grupo opuesto, en pasos de 50 o 100 conexiones necesitaría millones de pasos. Para llegar al extremo más lejano de la mitad del recorrido (recordemos que por ser la tierra esférica, el punto más alejado está a la mitad de la circunferencia), necesitaríamos $3 \times 10^9 / 50 = 60 \times 10^6$ intermediarios. Como se ve, es “menos eficiente” que la aleatoria.

Parecería que una red social se encuentra entre una ordenada y una aleatoria pues está altamente interconectada y se requieren pocos pasos para conectar a cualquier par de personas que la forman. Nuestros investigadores hallaron tal tipo de red y la denominaron “redes de mundos pequeños” (Small Worlds networks). Existen subredes altamente agrupadas (es la parte ordenada del grafo), pero también estas subredes tienden conexiones “al azar”, conexiones que rompen la homogeneidad del grupo y se conectan con otras redes lejanas (es su parte aleatoria).

Quedaría todavía una duda. Si bien la interconexión se puede asegurar conectando al azar nodos entre sí hasta garantizar que cada uno tiene 50 de los otros nodos conectados, ¿no podría ser que, en casos de nodos remotos, la cadena total tuviera 50, 100, 1000 o más conectores? ¿o caeríamos en el mágico número seis? Erdős nos dice que esta última opción es la correcta.

Para el caso de las redes sociales, como ya lo dijimos, Watts y Strogatz resolvieron este dilema utilizando redes altamente ordenadas a las que se les agregaron unas cuantas conexiones aleatorias, unos "atajos" que rompen la regularidad de la red. Son las llamadas "redes de mundos pequeños" (Small Worlds networks).

¿Estamos en un "Pequeño Mundo" como lo han mostrado las redes sociales? La pregunta se ha extendido más allá. Desde las redes metabólicas y la regulación genética de las células hasta el crecimiento explosivo de internet. El comportamiento del cerebro, la sincronización de la luz de las luciérnagas, el contagio de enfermedades, la moda, la bolsa de valores ... Esta es la "nueva Ciencia de las Redes" (networking).

Para profundizar un poco más en el tema se sugiere al lector que consulte el APÉNDICE literal A.8.1.

8.4. Características básicas de los sistemas complejos

Cilliers (ver Mitleton-Kelly, 2003, p. 128) hace un resumen de las principales características de los sistemas complejos:

- 1) *Individualidad*. Los sistemas complejos están compuestos por "individuos autónomos" llamados agentes. Son los elementos que caracterizan al sistema, que lo estructuran, tales como neuronas, hormigas, vehículos, personas...
- 2) *Interconectividad*. Los agentes están interrelacionados por una red de conexiones.
- 3) *Conectividad*. Mide el grado de las interacciones (relaciones) entre agentes. Puede ser: a) Total: todos los agentes están interconectados; b) escasa –pocos agentes lo están–; c) Intermedia, que es donde se encuentran los estados al borde del caos.
- 4) *No linealidad*. Por un lado, las relaciones causa efecto no son inmediatas ni proporcionales en el tiempo o en el espacio. Por otra parte, no es posible mediante relaciones de agregación explicar el comportamiento final de un sistema.
- 5) *Retroalimentación*. Se presenta aún en los sistemas escasamente conectados. Los lazos positivos tienden a desestabilizar, mientras que los negativos a

estabilizar (son los mecanismos de control). Los positivos empujan al sistema al borde del caos.

- 6) *Disipatividad*. Los sistemas complejos son disipativos en términos de Prigogine. Necesitan un flujo constante de energía del ambiente para mantener su complejidad, un estado estable alejado de la posición de equilibrio.
- 7) *Evolución*. Los sistemas complejos evolucionan, tienen una historia. No pueden existir leyes generales que se apliquen en forma independiente de la evolución específica del sistema y de sus circunstancias. El azar los afecta. No pueden ser promediados ya que su comportamiento está regido por las leyes del caos.
- 8) *Localidad*. Los agentes ignoran lo que hace el sistema. Reaccionan a la información local, únicamente.
- 9) *Autoorganización*. El resultado final, organizado, surge de las interacciones autónomas de los agentes. La estructura interna se adapta espontáneamente a los cambios del ambiente.
- 10) *Coevolución*. Dada la interconectividad de los agentes, es imposible que un cambio en alguno de ellos no afecte al resto del sistema. Cuando estos cambios puntuales generan lazos positivos, entonces se produce un gran cambio en el sistema (colapso o resiliencia).
- 11) *Emergencia*. Los agentes pueden “anidarse” formando subsistemas (jerarquías). Cada vez que esto sucede, ocurre un aumento en el orden del sistema. Esto se logra gracias a la energía importada del ambiente, como ya se ha indicado en repetidas oportunidades. Por lo tanto, los sistemas en equilibrio son incapaces de generar estas “islas de orden”, como las llamaba Prigogine. Y tales islas pueden ser alcanzadas por diferentes trayectorias, por lo que la predictibilidad es imposible.
- 12) *Autocatálisis*. El orden jerárquico es explicado por Kauffman mediante reacciones químicas autocatalíticas, siempre y cuando existan una gran cantidad de moléculas, y sólo como producto del azar. Las soluciones autocatalíticas son lazos de retroalimentación positiva. Este proceso continúa hasta lograr un punto de bifurcación: en el sistema surgen elementos reguladores (disminuye la capacidad catalítica del sistema) y se alcanza un estado estable, al borde del caos.

8.5. Complejidad y sistemas sociales. Administración

Hemos considerado sistemas que se comportan en forma “egoísta”. No tienen propósitos comunes. En el caso de la bolsa de valores o de los “trancones” de tráfico, por ejemplo, cada individuo actúa, en general, de forma individual. Son los SFC. Estas mismas reglas se han encontrado que se aplican a ciertos sistemas adaptativos complejos (SAC). ¿Acaso no se podrán aplicar el estudio de la complejidad de los sistemas de la actividad humana, actividades que, según nuestra definición, tienen propósitos comunes? ¿No es la administración un sistema complejo que pueda ser estudiado por esta teoría?

Este texto ha resaltado la forma cómo la Teoría General de Sistemas ha permeado el concepto de administración. Sin duda que la ciencia que más ha influido en este campo del conocimiento es la sociología, sin desconocer los aportes de la economía y la psicología. Por lo tanto, haremos un rápido recorrido por los conceptos sociológicos vistos desde la complejidad y que empiezan a tener importante influencia en el campo de la administración.

Existen una serie de ideas, algunas dispersas, otras francamente en contradicción, que empiezan a surgir en este importante tema. Nos guiaremos por el trabajo de compilación hecho por E. Mitleton-Kelly (*Op. Cit.*).

Aquí la definición de complejidad también tiene diversas opciones: complejidad objetiva, complejidad de experiencia subjetiva, complejidad individual. En cuanto al uso de los conceptos sobre complejidad algunos autores resaltan su importancia como metáfora, mientras que otros niegan tal uso y consideran que son conceptos reales, aplicables a lo social. Esto lleva a la consideración de diferentes dominios epistemológicos¹¹⁸.

Esta autora (p. 24) resume en cinco grandes áreas la investigación sobre la complejidad: Sistemas adaptativos complejos, estructuras disipativas, autopoiesis de Maturana (la visión de Luhmann), Teoría del Caos, retornos crecientes (que llevan a múltiples puntos de equilibrio, por oposición a la visión clásica de los retornos decrecientes que tienden a un único estado de equilibrio) y dependencia de las trayectorias (influencia de la tecnología) de Brian Arthur y otros economistas. Obviamente en estas áreas se hacen presentes los principios generales indicados en el numeral 8.4.

118. El lector interesado puede consultar el capítulo 11 del libro de Mitleton-Kelly *Op. Cit.*

Hemos hecho diferencia entre los sistemas intencionados y los intencionales. Podríamos decir que en el caso de la complejidad vista hasta ahora, los sistemas son o se comportan como intencionales. Sin embargo, los sistemas humanos son intencionados y esta característica fundamental debe ser tomada en cuenta, y la posible “adaptación” de cada uno de los temas arriba indicados debe incluir tal aspecto.

Es posible encontrar comportamientos sociales que se asemejen a organizaciones de hormigas, sigan la ley $1/f$, se comporten según el patrón multitud-antimultitud o tengan una estructura de red del tipo “mundos pequeños”. No obstante, las propiedades emergentes reproducibles a partir de estos modelos no tiene la complejidad que ostentan las de los sistemas sociales, integrados por “agentes” que toman decisiones comunes. Es claro que la emergencia que surge de los agentes egoístas está supeditada a las reglas que rigen el comportamiento de los mismos y es el resultado de interacciones favorables que han permitido que el sistema u organismo se adapte al ambiente.

En el caso de los sistemas sociales la situación es diferente. El sistema surge motivado por los propósitos de algunos (o todos) sus miembros. Por ello hablaríamos de una “emergencia de tercer orden” distinta a la de segundo orden que es la distintiva en el párrafo anterior. Esto es lo que diferencia a la sociología de la etología. No sólo el científico es quien distingue patrones de acciones colectivas, sino que el agente mismo lo hace, afectando sus propias acciones. La teoría de la autopoiesis de Maturana y Varela ha sido un soporte importante de esta emergencia de tercer orden. ¿Sería posible explicar, también al menos parcialmente, este tipo de emergencia con las teorías aquí expuestas?

Tal vez aquí la observación hecha por Nicolis & Prigogine (en Mitleton-Kelly, 2003, p. 26) adquiere mucho sentido:

Es más natural, o al menos, menos ambiguo, hablar de *comportamiento complejo* que de sistema complejo. El estudio de tal comportamiento podrá revelar ciertas características comunes entre las diferentes clases de sistemas y nos permitirá acercarnos a una comprensión de la complejidad.

Dicho de otra manera, así como la inteligencia sólo puede ser medida en términos de un comportamiento inteligente, la complejidad sólo puede ser medida en términos de un comportamiento complejo. ¿Una definición operativa?

¿Sugeriría esto hablar de una “Teoría General de Comportamientos Complejos”?

El concepto de *Capital Social* (Bourdieu, Coleman, Putnam...) podría ser de gran ayuda para armonizar una visión egoísta de los agentes con una de cooperación común a un sistema social.

Desde el punto de vista de la economía existen tres tipos de capitales: físico, humano y social. El primero se refiere a los objetos que poseemos, el segundo a lo que el individuo puede dar y el tercero aquello que es generado por las interrelaciones entre los individuos basadas en la reciprocidad y confianza que se genera en un grupo social en un momento dado.

Estas redes pueden ser formales o informales. Las primeras están compuestas por miembros oficiales, mientras que las segundas por personas que se reúnen espontáneamente por simpatía o amistad. Por otra parte, pueden tener estructuras horizontales o verticales. Las horizontales están formadas por personas de un mismo rango social y de poder, lo que facilita la comunicación pues la confianza entre los individuos es natural. Las segundas se estructuran mediante jerarquías y dependencias. Las verticales difícilmente pueden mantener confianza y cooperación. Estas dos estructuras son conceptos ideales. En la realidad las redes que se forman son un intermedio entre estas dos. Entre más densa la red, mayor cooperación existirá ya que un comportamiento egoísta va en contra de las ventajas colectivas. Es en este punto en el cual las reglas de comportamiento que rijan a la red (formada por elementos egoístas) deben corresponder a un *egoísmo altruista*¹¹⁹ (normas de reciprocidad, equidad en la repartición de los bienes pero no necesariamente de manera inmediata) o de lo contrario serían objetadas y la red no se formaría (Julia Häuberer, 2011). ¿Acaso no es esto un acercamiento a las redes de pequeño mundo? Por lo menos nos explicaría porqué se forman "camarillas" o hubs.

Otro aspecto que es de importancia en el comportamiento complejo es la *multidimensionalidad*: "todas las dimensiones interactúan y se influyen unas a otras" (Kauffman *Op. Cit.* p. 27). Estas dimensiones se refieren a aspectos sociales, culturales, técnicos, económicos y globales para el caso de los sistemas humanos.

Resumiendo lo visto hasta ahora: en un sistema complejo el comportamiento inicial puede ser aleatorio, pero la competencia por un recurso escaso produce un comportamiento que fluctúa menos que cuando es aleatorio. Al existir ciertas "reglas del juego", el sistema podría tender a propiedades emergentes

119. Hegel dice que el Hombre histórico es aquel que hace coincidir sus deseos personales (su egoísmo) con los de una sociedad.

de autorregulación; hemos dicho que la retroalimentación es fundamental para que ésta se dé. Lo sorprendente es que la autorregulación no depende de la calidad de la información sino de que sea recibida por todos sin ninguna restricción, incluso si no hay colaboración de ninguna clase.

Con respecto a los sistemas de la actividad humana, si existen propósitos comunes entonces las “reglas del juego” tomarán características específicas, de tal manera que si tales reglas están de acuerdo con los propósitos, el sistema se podría auto regular para lograrlos. Esto es lo que se conoce como *visión compartida* (ver numeral 12.0)

Las anteriores consideraciones tienen como finalidad lograr que el sistema social se adapte y evolucione creando nuevo orden y coherencia, que son las características determinantes que definen la complejidad de tales sistemas.

Por otra parte, si los individuos actúan aleatoria o independientemente “es posible lograr un trabajo efectivo como grupo u organización, creando coherencia en ausencia de diseños preconcebidos” (Mitleton-Kelly *Op. Cit.* p. 27). Incluso se pueden generar nuevas formas de trabajo, nuevas estructuras y relaciones diferentes, en donde las jerarquías pueden ser ignoradas creándose grupos con intereses comunes no necesariamente acordes con los grandes intereses de la alta administración. Todo esto está en perfecto acuerdo con los principios de la complejidad indicados en este capítulo.

Sin bien, como ya se dijo, es posible modelar sistemas sociales complejos en los cuales patrones comunes a la psicología humana aparecen como resultado de la estructura y las interrelaciones de la red sin necesidad de recurrir a la búsqueda de un propósito específico, esto no excluye la existencia de interrelaciones en las cuales la búsqueda de un propósito juega un papel importante, como en los sistemas de la actividad humana. Lo que estamos diciendo es que en la identificación de cada agente, para estos casos, se debería incluir una variable que tienda a obtener más beneficio cuando exista una tendencia del agente hacia un “egoísmo altruista” (el logro de un propósito dado) que hacia un comportamiento completamente egoísta. Si la idea es adquirir el mayor beneficio posible, este se lograría por la primera opción, no por la segunda. Estas consideraciones toman gran valor para el caso de las organizaciones, tema a tratar en el siguiente numeral.

Adaptación y evolución son otras características que se han destacado con respecto a los sistemas complejos (son conceptos tomados de la biología).

Kauffman define la coevolución como “un proceso de paisajes acoplados y deformados en donde los movimientos de adaptación de cada entidad alteran los paisajes de sus vecinos” (Kauffman, *Op. Cit.* p. 29). Otra forma de ver la coevolución es *la evolución que sufre un dominio o entidad que depende parcialmente de la evolución de otros dominios o entidades relacionadas*. El sistema afecta y es afectado. La coevolución es una noción afín con el *empoderamiento*: ningún individuo u organización están exentos de poder. La coevolución implica responsabilidad. Debe existir cierta sensibilidad y preocupación por los efectos que el sistema pueda ejercer sobre otros sistemas y que sobre él puedan ejercer tales sistemas.

La adaptación se lleva a cabo en un tiempo relativamente corto, mientras que la coevolución implica un lapso mayor. La coevolución tiene que ver con el aprendizaje y la transferencia de información y conocimiento. El ejemplo de los zapatos dado por Maturana y citado en Mitleton-Kelly (p.31), es excelente para aclarar todos estos conceptos:

Cuando compramos un par de zapatos, tanto los zapatos nuevos como mis pies cambian para acomodarse el uno al otro. Ellos coevolucionan. Lo que observo a un macronivel después de usar los zapatos varias veces y sufrir de dolor en los pies es posiblemente una coevolución ocurriendo simultáneamente, ya que tanto mis pies como los zapatos cambian para acomodarse el uno al otro. Pero a un nivel micro de tiempo, en mis pasos minuto a minuto, podría muy bien existir una adaptación del uno al otro.

La comprensión de la autoorganización de un sistema, como recordará el lector, se inicia, en su visión moderna, a partir de las células de Bénard (*Cfr.* numeral 6.1.1). Al autoorganizarse este sistema crea orden y estructura en donde antes no existía, gracias a la importación de energía del ambiente que aparta cada vez más al sistema de su posición de equilibrio. Recordando que la estabilidad se puede alcanzar por varios caminos (en la células de Bénard, girar a la derecha o a la izquierda) esto permite introducir el concepto de *dimensión histórica*, “una especie de ‘memoria’ de un evento pasado que ocurre en un momento crítico y que afectará su evolución futura” (en Mitleton-Kelly, p. 32). También se presenta una *ruptura de simetría*: la homogeneidad de un orden dado se rompe y emergen nuevos patrones. En el caso de los sistemas sociales, la “energía” extra cedida por el ambiente es la información. El concepto, aunque relacionado con la entropía que a su vez está ligado al concepto de calor, puede formar parte, teniendo el cuidado necesario, de las explicaciones

de los comportamientos complejos de estos sistemas. Aquí es necesario tener en cuenta nuestra capacidad de decisión.

Se han presentado importantes problemas filosóficos en la aplicación de la Teoría de la Complejidad a las organizaciones.

Por ejemplo:

- La aplicación de modelos matemáticos y físicos a tales sistemas.
- El uso de metáforas y analogías en lugar de ideas concretas definidas desde una perspectiva sociológica.
- La confusión que se presenta cuando interactúan sistemas epistemológicos distintos. Cuando hablemos sobre metodologías indicaremos los propuestos por Burrell y Morgan.

8.5.1 Organizaciones

Los sistemas complejos, incluyendo los sociales, se pueden explicar a partir de las interacciones de los elementos individuales.

Una organización es un sistema social complejo; esta visión le da al administrador herramientas para crear las condiciones que ayudarán a las organizaciones a adaptarse (coevolucionar) ante un ambiente cambiante, tanto en lo económico como en el mercadeo.

Algunos autores distinguen entre un “sistema social” y un “agregado de individuos”. El sistema social implica un grupo de individuos con propósitos comunes (un sistema intencionado). Esto trae como consecuencia que el sistema social sea autogenerado por las interrelaciones de los roles individuales, no impuesto por reglas externas. Cuando tales reglas vienen del ambiente, se hablará entonces de “Instituciones”. En esta visión, la emoción y el amor que se expresan a través del lenguaje, son las fuerzas primarias que gobiernan al sistema social. Escuchemos a Maturana a este respecto (2004, p. 90):

El decir que lo emocional tiene que ver en nosotros con lo animal, ciertamente no es novedoso; lo que yo agregó, sin embargo, es que la existencia humana se realiza en el lenguaje y lo racional, desde lo emocional. [...] Todo sistema racional y, en efecto, todo razonar, se da como un operar en las coherencias del lenguaje a partir de un conjunto primario de coordina-

ciones de acciones tomado como premisas fundamentales aceptadas o adoptadas, explícita o implícitamente, *a priori*. Pero ocurre que todo aceptar *a priori* se da desde un dominio emocional particular en el cual queremos lo que aceptamos, y aceptamos lo que queremos sin otro fundamento que nuestro deseo que se constituye y expresa en nuestro aceptar. En otras palabras, todo sistema racional tiene fundamento emocional, y es por ello que ningún argumento racional puede convencer a nadie que no esté de partida convencido al aceptar las premisas *a priori* que lo constituyen.

La conversación crea la cohesión formando un sistema social. Esta cohesión está modulada por emociones tales como el amor y la solidaridad. El significado de estas interrelaciones emerge del sistema mismo. Por eso decimos que es un sistema intencionado. El mismo sistema social crea la capacidad de aprendizaje y cambio, los fundamentos de un sistema adaptativo. Esta capacidad de adaptación hace que los significados, emanados de los individuos, se conviertan en significados compartidos por el grupo: esto es lo que denominamos la capacidad de autoorganización.

Otros definen la organización como un sistema adaptativo complejo que tiene la capacidad de tomar decisiones las cuales pueden influir en sus configuraciones actuales y futuras (MitletonKelly, p. 7): las componentes que interactúan dentro de una organización (tecnología, personas, información...) se autoorganizan para crear orden; la comprensión de la emergencia de estas configuraciones ayuda a la organización a identificar nuevas oportunidades; finalmente tales configuraciones organizacionales se conceptúan como sistemas adaptativos complejos que poseen metas de adaptación.

Otro asunto estudiado por esta nueva rama de la complejidad es el relacionado con la pregunta: ¿Qué causa el orden? De nuevo, las bases se han buscado en la teoría clásica de la complejidad específicamente en la mecánica cuántica. Conceptos como entramado (entrelazamiento), historias correlacionadas, decoherencia y grano-grueso intentan explicar la creación de nuevos órdenes en las organizaciones.

El entramado (entrelazamiento), como ya se indicó, se refiere a la interdependencia de dos entidades (electrones o individuos), de tal forma que no pueden actuar ni ser explicados (considerados) en forma separada, sino simultáneamente. Esto ocurre porque las entidades tienen *historias correlacionadas*. La negación del entramado se denomina *decoherencia*. Dice McKelvey (ver Mitleton-Kelly, p. 8):

La primera parte del argumento es que las firmas necesitan crear y recrear nichos de entramados mediante la introducción y mantenimiento de la variedad y desestimulando la retención de estructuras obsoletas mantenidas por grupos dominantes, especializaciones avanzadas, límites funcionales estrechos etc. Es necesario la decoherencia o desordenamiento de las estructuras viejas para evitar la contaminación, si ha ocurrido, del nicho de entramado.

De nuevo, Diamond (2006-b, p. 523) roza este tema cuando comenta cómo un grupo de empresarios y economistas, a través de cartas, señalaban posibles paralelismos entre las historias de las sociedades humanas analizadas en su libro y las de grupos del mundo empresarial:

Esta correspondencia remitía a la siguiente cuestión de carácter general: ¿cuál es el mejor modo de organizar grupos, instituciones y empresas para maximizar la productividad, la creatividad, la innovación y la riqueza? ¿Deberá el grupo contar con una dirección centralizada (llegado al extremo, un dictador) o sería mejor un liderazgo más difuso o incluso la anarquía? ¿Debería esa agrupación de personas organizarse en un único grupo o descomponerse en una serie mayor o menor de subgrupos? ¿Deberá existir comunicación fluida entre los grupos o sería mejor erigir muros de confidencialidad entre ellos? ¿Se deberían imponer aranceles proteccionistas frente al exterior o sería mejor exponer el negocio a la libre competencia?

Una tendencia actual es dejar que las organizaciones se fragmenten en partes que tengan cierta autonomía. Las organizaciones sin “jefes que ordenan” tienden a ser más efectivas que las tradicionales. Pero una condición fundamental es que debe existir plena confianza entre las personas que conforman la organización.

Resnick cita a Semler (p. 10) para dar una explicación del porqué de esta tendencia:

La pirámide organizacional es la causa de mucho daño corporativo, porque la cima está muy lejos de la base. La pirámide enfatiza el poder, promueve la inseguridad, distorsiona las comunicaciones, traba la interacción, y dificulta que la gente que planea y la que ejecuta se mueva en la misma dirección.

La reingeniería es una de las formas de “aplanar” la pirámide, intentando que los mandos medios tengan más acción sobre las actividades fundamentales de la organización. Incluso hay experimentos de “grupos auto administrados”, grupos sin jefes que los dirijan. Otro ejemplo interesante es el grupo del “Santa Fe Institute”, grupo de investigadores de alto nivel, sin un director general. Resnick hace un recuento de cómo estas ideas han permeado, además de los campos aquí citados, la tecnología, los modelos científicos, las teorías del yo y la mente, la teoría del conocimiento.

Desde la perspectiva de la Teoría de la Complejidad las transformaciones organizacionales tienen sus bases en tres conceptos:

- Las estructuras, los procesos y los procedimientos de una organización pueden tener su origen en un conjunto sencillo de reglas de generación (las que hemos denominado aquí, las reglas básicas en el caso del juego de la vida y los boids de C. Reynolds).
- A través de la retroalimentación positiva, cambios en las reglas del juego que sean aplicadas al comportamiento y que sean consistentes con el mismo, inducen cambios en la organización. Esto se enfrenta a las retroalimentaciones negativas dominantes en las organizaciones y representadas por los presupuestos, las predicciones, los reportes de progreso, los planes de acciones correctivas etc.
- Para que una organización esté suficientemente abierta a su ambiente y pueda producir un cambio en sus reglas de generación, es necesario que esté en condiciones alejadas a las de equilibrio.

Para lograr lo anterior la organización debe, inicialmente, identificar y reformular las reglas que rigen su comportamiento actual. Las reglas revisadas deben ser aceptadas por la organización.

Una vez logrado lo anterior, la organización debe moverse hacia un estado alejado de su estado de equilibrio, para que la nueva estructura pueda operar. Un inicio de crisis, real o causada, debe producirse. Esto se manifiesta, por ejemplo, en la redefinición de roles y responsabilidades. Esta situación hace que la organización “se abra” de tal forma que pueda importar energía del ambiente, generando una especie de “estructura disipativa”. El nuevo orden empezará a formarse por sí mismo.

Surge entonces una lucha entre la antigua estructura, considerada como segura, y la nueva en formación. La administración debe estar atenta a fortalecer los signos favorables que indiquen que la nueva estructura es conveniente (usando retroalimentación positiva), y a contrarrestar las acciones pasadas que, en ocasiones, brindan resultados mejores pero sólo a corto plazo (mediante retroalimentación negativa). Este procedimiento puede tacharse de reduccionista, simplista y mecanicista. Sin embargo, es una manera útil de poder dar el salto del equilibrio al no equilibrio (o estabilidad al borde del caos). Esto podrá asimilarse a los diversos tipos de investigación, que consideraremos en el capítulo siguiente. Lo tradicional sería afín con las investigaciones tipo 1 y tipo 2 (investigación tradicional: marcos teóricos prefijados); los cambios con la tipo 3 y tipo 4 (investigación en la acción: marcos teóricos en construcción). De todas maneras, no debemos perder de vista que los cambios obtenidos no son deducibles directamente de las reglas de generación, debido a la ley de la emergencia sistémica. Se necesita una retroalimentación continua con la observación conjunta de toda la organización, lo cual implica una gran confianza entre unos y otros. Es un balance entre lo cuantitativo y lo cualitativo. Es la deseada unión entre los enfoques duros y los enfoques blandos. Son la ciencia y las humanidades trabajando en conjunto por una organización mejor.

Sin embargo existe otra opinión: la de introducir "caos" en organizaciones bien estructuradas. Brafman & Pollack (*Op. Cit.*) proponen que, dentro de las organizaciones que deseen desarrollar cambios favorables para lograr mayor adaptación y ser más creativas, se deben crear *espacios en blanco*: momentos en los cuales no estamos concentrados en la tarea que estemos realizando, sino que dejamos que la mente "divague" en asuntos no directamente relacionados.

El fundamento de lo anterior se basa en los descubrimientos de las neurociencias que han comprobado que si bien el cerebro entra en gran actividad en las zonas que tienen que ver directamente con lo que estamos haciendo, el resto del mismo también está en actividad. Es más: si se deja la tarea de lado, todo el cerebro entra en gran actividad. Prácticamente no hay diferencia en el grado de actividad cerebral (consumo de energía) entre uno y otro estado. En efecto, en el primer caso el cerebro se activa fundamentalmente en los centros encargados de atender la tarea: en el segundo entre un 80 y 95 por ciento entra en funcionamiento: estamos comprendiendo el mundo, estableciendo interrelaciones, recordando, estructurando. Esta cadena de conexiones sólo se activa cuando dejamos de lado aquello en lo que estamos concentrados. Y entonces aparecen nuevas ideas, nuevas formas de ver el mundo, aparecen los "eureka".

Para que esta idea rinda sus frutos en una organización, es necesario, además, que existan *sospechosos no habituales*, personas que piensen diferente, que vean las cosas de otra forma, que incluso a menudo nos incomoden. Ellos aportan opciones que pueden generar cambios importantes.

Un tercer elemento debe tenerse en cuenta: la *causalidad organizada*. Se trata de "preparar" el terreno del espacio en blanco para que en forma aleatoria se puedan presentar las ideas revolucionarias. Dar la opción a que se formen relaciones como las que se crean aleatoriamente en las redes de pequeño mundo. Por esto se habla de *caos organizado*.

Los autores citados dan varios importantes ejemplos del uso de estas ideas en diversas organizaciones, desde hospitales y centros de estudio, hasta el ejército de los Estados Unidos de Norteamérica.

Con respecto a la posición más extrema, ya no de un caos organizado sino la de un cambio total en las estructuras organizativas en Mitleton-Kelly, Cap. 8, Roger Lewin & Birute Regine citan varias experiencias exitosas. Mencionemos algunas:

- "Industrial Society", una empresa de asesoría de Inglaterra que tiene 300 personas, y representada por Tony Morgan (CEO¹²⁰).
- Monsato, una organización de 22.000 personas, bajo la dirección de Bob Shapiro (CEO).
- Du Pont, Belle Plant (Virgina del oeste), director de planta, Dick Knowles.
- VeriFone, compañía de alta tecnología con 300 empleados. CEO: Hatim Tyabji.
- Hunterdon Medical Center (Flemington, New Jersey). Vicepresidenta de la sección de cuidados al paciente: Linda Rusch.
- St. Luke, agencia de publicidad en Londres, Inglaterra.
- River's Café, restaurante en Londres.
- Barclays Home Finance Division, CEO Mike Ockenden.

Con el fin de ilustrar un poco las ideas expuestas, escuchemos a Tony Morgan y su experiencia en "Industrial Society":

120. CEO: Chief Executive Officer o también MD: Managing Director.

Por naturaleza me gusta siempre mandar y controlar, pero a medida que lo hacía empecé a darme cuenta que mandar, controlar y pensar linealmente tenían una vida global muy limitada. Por lo tanto, enfrenté la empresa desde un ángulo completamente diferente. Empecé a pensar en cómo cambiar a las personas desde una organización estructurada a una no estructurada, y no lo hice mediante un diseño, sino por intuición. Encontré que las interrelaciones son los elementos más importantes para lograr procesos no lineales. Sin estos procesos nada funcionará. Lo que ocurre es que nos volvemos más atentos a comportamientos que tienen resultados positivos en lugar de negativos.

No me concibo como un líder sin la carga de una responsabilidad para crear relaciones positivas y poderosas con todos aquellos con los cuales me relaciono. Y llamo relacionarme cuando puedas hablarme abiertamente en todo momento. Y esto es muy difícil debido a que tienes que ser interactivo y trabajar constantemente para lograrlo. Esto fue una aventura para mí, viniendo de una tradición de mandato y control, pero si Ud. cree que nunca me desperté en la mitad de la noche y me dije “esto parece estar muy descontrolado”, están equivocados. Pasé la mayoría de las noches pensando en ello. Es por esto que este trabajo se ha convertido en uno de los más exigentes, porque si Ud. trabaja dentro de cajas, es fácil, ya que esto no tiene que ver con la gente; lo otro es mucho más difícil.

En otras palabras, cuando las interrelaciones son los medios para guiar procesos no lineales, los líderes tienen que ver los límites de su control, y ésta no es una tarea fácil. Deben enfocarse en el poder del mundo interconectado de las interrelaciones y en los lazos de retroalimentación que las crean y alimentan. Las interacciones, es decir, las interrelaciones, generan las propiedades emergentes, que es el distintivo de la complejidad. Al enfocarse en las interrelaciones el líder comienza a ver a la organización como una red humana interconectada, un organismo viviente que se desdobra, fluctúa y emerge, una visión más orgánica de la organización. Desde esta perspectiva, el lugar de trabajo se convierte en un experimento en progreso. Es el aprender haciendo, la investigación en la acción.

Lo que hemos dicho deja la sensación de que el uso de estas ideas son una panacea para cualquier organización y tipo de administrador. Vale la pena anotar lo que dicen W. Crulle y R. L. Gordon (2011, p.10-11):

Un gerente de proyecto debe prepararse para el cambio en un proyecto y debe mantener un nivel de conexión con los contactos y clientes potencia-

les. La Teoría de la Complejidad va más allá de ser líder del *laissez-faire* que emite órdenes discrecionales; se trata de crear un propósito sólido al que los individuos se adhieran. Inculcar el propósito está en la raíz del éxito de la Teoría de la Complejidad. Con este fin, el director del proyecto debe ofrecer apoyo a este proceso para que tenga continuidad en el futuro.

[...] Los gerentes de proyecto deben comprender que la complejidad puede operar en dos sentidos: en uno positivo al proyecto, o si se aplican incorrectamente, como uno negativo. Los cambios se suceden de igual manera ya que pueden ser visto como positivos para un proyecto o como algo negativo (Brown y Eisenhardt, 1997). La complejidad se percibe exactamente de la misma manera por los directores de proyectos. Del mismo modo que ofrece nuevas ideas y nuevas formas de corregir los problemas, puede también ser utilizada para ocultarlos y suprimir el cambio. Entender que ambas situaciones son posibles es fundamental para lograr el éxito futuro. Para hacer la diferencia, es necesario comprender que la complejidad puede producir cosas buenas, pero también puede ser utilizada por otros para oscurecer un proyecto.

El administrador moderno debe pasar de una estructura fija, basada en modelos mecanicistas, a una al borde del caos. Como dicen los autores Roger & Birute, los líderes se mueven en la paradoja de *ser un líder no líder* (o *liderar no liderando*).

8.6 Resumen

En este capítulo continuamos el tema de la complejidad a través de la lente del sistema como una red.

Se muestra cómo muchos fenómenos poseen una complejidad que surge de comportamientos individuales, autoorganizándose, sin que exista un sistema superior que los controle o dirija.

La teoría de la multitud-antimultitud con una visión desde las probabilidades nos muestra cómo un sistema, en el cual la gente puede tomar decisiones de acuerdo con una historia, con una experiencia (es decir, poseer memoria), tiende a estados perfectamente diferenciados de “ir o no ir”, “comprar o no comprar”. En estos sistemas, el comportamiento autónomo de cada individuo basado en una información común, hace que, a la larga, por ejemplo, lo que se

vende y se compra se establezca (mano invisible), o que en la bolsa el sistema tienda a un comportamiento estable. El sistema se autorregula.

La teoría de los Autómatas Celulares nos muestra cómo la complejidad surge de la simplicidad. Estos autómatas permiten simular en paralelo, diferente a la forma clásica de la simulación secuencial. Su aplicación en los sistemas sociales ha demostrado ser de gran importancia para la comprensión del comportamiento de las sociedades, entre otros fenómenos complejos.

La Teoría de Grafos entra en escena con su importante bagaje matemático. Una teoría con más de dos siglos de desarrollo, recibe un nuevo impulso. Ella destaca la importancia de la ley de la potencia que muestra una propiedad común a muchos fenómenos complejos: la relación entre la magnitud de una variable y la frecuencia con que esta magnitud se presenta. En el eje horizontal aparece como magnitud, por ejemplo, el tamaño de un meteorito o la intensidad de un terremoto y en el eje vertical, su frecuencia: número de meteoritos con un tamaño dado o número de terremotos de cierta intensidad. Se genera, pues, una curva cuya parte final o cola tiende a aplanarse.

Kauffman ha estudiado la complejidad desde lo que podríamos llamar una “biología virtual”. Su juego de los botones y el estudio de las redes booleanas han arrojado mucha luz sobre los comportamientos de las redes.

En el juego de los botones encontró que, uniéndolos al azar, una vez que el número de conexiones dividido por el número de botones pasa del valor 0.5 la red empieza a conectarse completamente, a una gran velocidad. A partir de allí, estudia las implicaciones que esto tiene para el origen de la vida, basándose en la reacción Belousov-Zhabotinsky.

Por otra parte, con el estudio de las redes aleatorias booleanas (redes compuestas por estados de valor 0 o 1 en cada vértice), Kauffman descubre cómo las redes $k = 2$, aquellas en que cada nodo recibe dos conectores (aristas) y sólo dos, tienden a estabilizarse en un número muy pequeño de ciclos. Redes muy complejas de un número grande de nodos (vértices) y una enorme maraña de interconexiones, alcanzan la estabilidad en un número muy reducido de iteraciones, iniciándose con estados aleatorios en cada nodo. De acuerdo con los resultados de estos experimentos virtuales, las opciones de evoluciones favorables para la vida, en donde se den las condiciones mínimas, son muy altas.

Además, hemos puntualizado conceptos relativos a los grafos: su definición, su grado y su tamaño, el significado de un grafo- k , los que son ordenados y

los aleatorios, todo esto para proponer una teoría que explique un fenómeno extraordinario común a muchas redes: la opción de conectar dos pares cualesquiera de vértices, con una secuencia de seis conexiones o menos. Afín a este problema está el relacionado con la búsqueda del menor número de conexiones necesarias para que todos los elementos de un grafo (sus nodos o vértices) queden interconectados.

En correlación con todo lo anterior surge el tema de los mundos pequeños (Small Worlds). El experimento de Milgram (en el cual se conjeturó que entre cualquier par de personas de nuestro planeta, la máxima separación –siguiendo un camino ininterrumpido– era de seis conexiones o de seis “grados de separación”), centró la investigación en un tipo especial de grafos: aquellos que se encuentra entre uno completamente ordenado y uno aleatorio.

Estudios posteriores demostraron que la propiedad de ser un “pequeño mundo”, podía observarse también en las redes del metabolismo de los seres vivos, en la regulación genética de las células, en la red de internet, o en la manera en que opera nuestro cerebro...

Con todo el bagaje acumulado se ha intentado describir las principales propiedades de los llamados “sistemas complejos” que, según Nicolis y Prigogine, deberían ser entendidos más bien como “comportamientos complejos”. En este sentido, hicimos referencia a las propiedades que cumplen tales sistemas.

Las ideas expuestas, sobre todo las que han influido en la sociología, han tenido gran impacto en la administración moderna. La idea de agentes autónomos regidos por reglas sencillas que logran una autorregulación, se ha convertido en un campo de estudio profundo en la administración actual. Muchas empresas han comenzado a liberar a la institución de la pesada carga de un control y una regulación ejercida desde la cima por pocas personas que se abrogan el derecho a dirigir y coordinar el sistema en la dirección que ellos creen conveniente. Ahora se acepta que el mundo exterior, el ambiente del sistema, se puede comunicar con éste a través de sus elementos básicos y no mediante sistemas reguladores que filtran la información. “Aplanar la pirámide organizacional”, la idea propuesta por la reingeniería, adquiere aquí toda su dimensión. De esta manera, las organizaciones se vuelven más creativas, se adaptan mejor a los cambios del ambiente. En suma, se da el paso decisivo para lograr una “organización inteligente”.

CAPÍTULO 9

METODOLOGÍAS. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

9.0 Metodología, método, técnica

La concepción moderna del concepto de metodología la define como “1. Ciencia del método. 2. Conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal” (DRAE).

Las metodologías son el *logos* del método, sus principios¹²¹. Podríamos decir que son su patrón, que se estructura en diferentes tipos de métodos. Cuando estos principios se utilizan para describir, analizar, informar, estudiar una situación particular, el nivel de aplicación lleva a tales principios a un nivel muy diferente del de la metodología. La metodología se convierte en un “método” cuya forma particular es el enfoque específico que se ha adoptado, las particularidades que han tomado los principios para ser aplicados. Por su parte, si los métodos tienen éxito a medida que se van aplicando en situaciones similares, entonces se convertirán en técnicas.

Sea esta la oportunidad para retomar el tema del llamado *método científico* al cual nos referimos en los capítulos iniciales de este texto. De acuerdo con lo anterior, sería más pertinente hablar de una *metodología de la ciencia*, una guía general que implica la observación cuidadosa de los hechos, la proposición de hipótesis, la verificación de las mismas, la explicación de los hechos que la teoría estudia a partir de las hipótesis propuestas, la predicción de nuevos fenómenos no observables o no conocidos. Esta metodología se expresaría en los diversos métodos que las diferentes ciencias utilizan para desarrollar sus propuestas y explicarían las diversas técnicas utilizadas.

Las metodologías están a un meta-nivel con respecto a los métodos. Por esta razón, no tiene sentido aplicarlas como reglas fijas a seguir. Checkland aclara:

En situaciones reales, cuando una metodología se aplica, tres elementos están en continua relación: el usuario, las palabras sobre el papel y la situa-

121. La mayor parte de las ideas de este capítulo son tomadas de: P. B. Checkland (2000) y Michael C. Jackson (2000).

ción percibida por el usuario. Y esta relación incluye convertir la metodología (como un conjunto de principios) en un enfoque específico o “método” que el usuario cree apropiado para esta situación particular en un momento dado de su historia.

Se puede criticar el método aplicado, mas no la metodología. Ninguna metodología logra mejoras. Ella ayuda al usuario a proponer cambios que no lograría sin su uso. Diferentes usuarios, ante una misma situación pueden llegar a propuestas muy distintas utilizando la misma metodología.

La ya discutida objetividad de la ciencia tiene cabida aquí para reforzar lo que acabamos de decir. No es sencillo separar las influencias de los cuatro ídolos de Bacon (*Novum Organum*, p. 31-) que tienen que ver con nuestras percepciones y nuestras creencias, de la manera como consideramos el tratamiento de una situación como científica. Estos ídolos son: los de la tribu, que se fundamentan en los sentidos; los juicios se basan en la familia, en la nación. Los de la caverna, que están basados en el egoísmo y en el egocentrismo. Ambos se refieren a nosotros mismos, son innatos, y están relacionados con las malas formas de pensar. Los ídolos del foro, aquellos cuyos criterios están fuertemente influidos por los demás, por la sociedad. Y los del teatro, aquellas ideologías que dan una visión de mundo regida por una sola idea; estos últimos son externos a nosotros, son atraídos.

S. J. Gould (*Op. Cit*, p. 135), enfatiza la importancia de una visión libre, basada en un conocimiento coordinado de la ciencia y las humanidades. La falsa dicotomía que se ha creado debe ser eliminada:

Sólo puedo expresar una esperanza final de que la consumación de una unión tan favorable pueda no sólo destruir para siempre el mito estéril de la dicotomía, sino que pueda asimismo, en la saludable hibridación de modos mentales (que tanto tiempo hace que las humanidades han comprendido, y que tan bien practican) con técnicas de observación y experimento (que de manera tan fructífera han explotado las ciencias), producir un grupo de descendientes mixtos que denuncien que el concepto de dicotomía de oposición entre la ciencia y las humanidades es una negación necia de nuestras capacidades y complejidades mentales, una trampa no menos dañina y restrictiva del potencial humano que nuestros antiguos esfuerzos para mantenerlas inexistentes razas humanas a la vez separadas y desiguales.

Schrödinger (2009, p. 14) lo expresa así:

Nazco en un medio y no sé de dónde vengo, adónde voy ni quien soy. Esto le pasa a todo el mundo. El hecho de que todos hayan estado siempre en esta situación y vayan siempre a estarlo, de nada me sirve. La cuestión candente es dónde y adónde; lo único que podemos observar es nuestro entorno presente. Por ello nos esforzamos en averiguar lo más posible. Eso es la ciencia, aprendizaje, saber; ésa es la verdadera fuente de todo el esfuerzo espiritual del hombre. Tratamos de averiguar lo más posible sobre el medio espacial y temporal del lugar en que nos encontramos por el hecho de nacer. Y, conforme aprendemos, nos gusta, lo encontramos sumamente interesante. ¿No será quizás ese el fin para el que estamos aquí?

En el capítulo 1 dijimos que un *método* es una manera, un procedimiento, unas reglas que nos permiten llegar a un fin propuesto de antemano. No puede existir un método basado únicamente en el azar puesto que esto no conduciría con confianza al fin propuesto. Tal es el caso del estudiante que decide responder las preguntas de tipo “verdadero” o “falso” arrojando una moneda y asignándole, por ejemplo, a la “cara” la categoría “verdadero” y al “sello” la categoría “falso”. Esto estaría basado en el azar y no garantiza un resultado acertado: los métodos implican cierta regularidad en su aplicación. Otra característica importante es que un método puede abrirse en el sentido de que puede alcanzar otros fines, no propuestos inicialmente, en otros tipos de conocimiento pero conservando los mismos principios fundamentales. Por ejemplo algunos métodos utilizados en la física han servido para guiar aplicaciones en psicología, como es el caso de la psico-física. O el caso del uso de la estadística para comprender algunos comportamientos sociales, uso que pasó, dado su éxito, a ser utilizado por la física.

Los métodos están muy ligados a las realidades que buscan conocer. Aunque intentan cierta universalidad (sentido de generalidad en el campo en que se aplican), como se indicó anteriormente, se debe mantener en mente que no siempre es posible utilizar los métodos que son efectivos en un campo del saber, en otro. Esta observación es una buena guía para evitar la tan usada “transferencia de procedimientos”, que han tenido éxito en una situación y que se copian para enfrentar otra similar generalmente con resultados adversos.

Las ecuaciones del péndulo de Galileo surgen de la aplicación de una metodología general de la física: consideración del mundo formado por partículas, capacidad de aislamiento del fenómeno, aplicación de las tres leyes fundamentales de la dinámica newtoniana, la idea de que el todo puede explicarse a partir de la suma de subproblemas individuales, subproblemas que son

consideraciones separadas del concepto de fuerza, del concepto de trabajo, del concepto de equilibrio, resumidas extraordinariamente por la técnica de las ecuaciones diferenciales ordinarias. Con respecto a la familia, es posible tratarla como un sistema aislado. Verla como nodos que definen redes que pueden estudiarse bajo lo que se conoce como *Teoría de Redes*. O considerarla bajo la óptica de la *Teoría de Conjuntos*. O finalmente verla bajo el enfoque de un sistema animado o de uno social. En los capítulos que siguen haremos referencia a métodos y metodologías aptos para tales visiones.

Aquí vale la pena hacer una distinción respecto a la manera como podemos enfrentar situaciones que deseamos comprender, resolver o modificar, lo que da principios generales diferentes para proponer diferentes metodologías. Se trata del concepto “visión orientada por la técnica” y “visión orientada por el problema”. En el primer caso, es la técnica quien domina y, por lo tanto, el problema es ajustado a dichos conocimientos. Por otra parte, si nos orientamos al problema, éste nos indicará los conocimientos que deban utilizarse y, por lo tanto, si el sistema es complejo, nos obligará a consultar con otras especialidades, formándose así grupos interdisciplinarios. En el caso de “orientado por la técnica” lo que prima son los métodos, aquellos relacionados con las teorías y técnicas a utilizar; cuando se es “orientado por el problema”, son las metodologías las que priman: buscar la combinación de métodos y herramientas que ayudan a enfrentar la situación en estudio de una manera armónica, coherente. El péndulo de Galileo es un buen ejemplo de un estudio orientado por la técnica. Para comprender la familia, sin duda es más conveniente guiarnos por un estudio orientado por el problema.

Toda metodología debe estar incorporada en un *marco conceptual F* el cual permite expresar las ideas relacionadas con el fenómeno en estudio; es el que demarca los principios generales. La figura 9.1, propuesta por Checkland, es una buena ayuda para fijar las ideas que vamos a discutir.

Este marco puede ser una teoría de una disciplina particular o, incluso, conceptos no tan exactos como los de una teoría. En él existe una *metodología* que propone el uso de varias herramientas, técnicas y procedimientos de manera apropiada al marco conceptual, la cual trata de enfrentar un área de interés que puede ser una disciplina particular o un problema de la vida real. El tercer elemento es el *área de interés A* que puede ser un problema particular de una disciplina dada o una situación del mundo real a la cual es posible que no se le conozca aún un marco teórico que la abarque.

Relación entre teoría, metodología y práctica

Fig. 9.1

9.1 Tipos de investigación

Es importante aclarar que si bien toda teoría implica el uso de un método o una metodología, estas (las metodologías) pueden basarse en varias teorías. Cuando hablamos de práctica nos referimos a la intervención en el “mundo real”. Este esquema permite analizar diferentes tipos de investigación.

Un *primer tipo* es el caso de los “estudios eruditos”, aquellos que intentan considerar situaciones del mundo real mediante un marco teórico de referencia. En este caso el marco F presta la disciplina que posee una metodología o método M el cual se aplica al área de interés A . Es lo que ocurre cuando se explica el movimiento de un proyectil utilizando el marco teórico de las leyes de Newton. Las tesis de pregrado, así como la investigación aplicada utilizan mucho este tipo de investigación.

Un *segundo tipo* de investigación es el utilizado por la ciencia tradicional y su posición positivista. Se plantean hipótesis que intentan explicar un aspecto del mundo real, hipótesis que están fundamentadas en el marco conceptual F de la ciencia respectiva. La metodología o método M de la ciencia utilizada, indica los experimentos y observaciones que deben llevarse a cabo en el mundo real A , con el fin de constatar o rechazar las hipótesis propuestas. El proceso con-

duce a un mayor conocimiento de F , M y A . Este procedimiento se ha utilizado también en la Ciencia Social, como se indicó en el capítulo 1. A partir de F surge un modelo que busca explicar algún aspecto de A . Por ejemplo, se desea conocer en psicología la inteligencia de una persona con problemas mentales. La teoría de las pruebas de inteligencia (“tests de inteligencia”) indica cómo esto puede llevarse a cabo, es decir, poseen un método. Se aplica el test y es muy posible que dadas las dificultades que presenta el paciente, sea necesario revisar el marco teórico y desarrollar una metodología. Afinado el proceso, queda una nueva propuesta teórica (un marco F) mejorada, una ampliación de las metodologías de dicho marco y la posibilidad de enfrentar nuevas situaciones con mayor éxito.

Estos dos tipos se centran más en F que en A . Son los controlados por la comunidad académica que buscan ser los guardianes de F . En cierta forma, el tipo de problemas a analizar queda condicionado por el marco conceptual. Abarca tanto la ciencia normal como la extraordinaria en el sentido de Kuhn. En el capítulo anterior hicimos referencia al sistema formal de Bertalanffy y al de Lange. Ellos pertenecen a estos dos tipos de investigación. En la clasificación de Gibbons *et al.* (1994) se conocen con el nombre de *modo 1 de investigación*.

Un *tercer tipo* de investigación (Gibbons *et al. modo 2*) es aquel que, aunque similar al modo 1, busca enfrentar situaciones particulares de A solicitadas por un usuario. La investigación se realiza alrededor de A , negociando los resultados que satisfagan al cliente. En este caso, no siempre existe una disciplina que permita un F único, ya que el origen de la investigación es el mundo real A y es difícil que exista un único marco teórico que lo incluya completamente. Como dice Comte (1980, p. 43-44.), padre del positivismo:

Las divisiones que establecemos entre las ciencias, sin llegar a ser arbitrarias como algunos creen, sí son esencialmente artificiales. En realidad, el objetivo de nuestros esfuerzos es uno solo; lo dividimos únicamente con la intención de evitar dificultades para mejor resolverlas. Sucede más de una vez, que a pesar de nuestras divisiones clásicas, hay cuestiones importantes que exigirían una combinación de distintos puntos de vista especializados, lo cual no puede suceder en la constitución actual del mundo del saber, lo que contribuye a dejar ciertos problemas sin solución durante más tiempo del que sería necesario. Este inconveniente se presenta sobre todo en los puntos más esenciales de cada una de las ciencias positivas.

Lo anterior fue escrito en 1830 pero su vigencia es manifiesta. Este tipo de investigación es interdisciplinario (Jackson habla de *transdisciplina*¹²²). El marco referencial que surge puede ser transferible a otras situaciones. *F* es aquí menos preciso que en el modo 1 ya que incluso puede ser relevante sólo para una aplicación específica. Las deficiencias en *F* son compensadas por un intento de mejorar la metodología *M*. Podemos citar a la Investigación de Operaciones y al Análisis de Sistemas. Por ejemplo, se necesita resolver un problema de inventarios en una empresa. Para ello se pueden utilizar modelos de la teoría de inventarios, modelos de programación lineal y la Dinámica de Sistemas, todas ellas coordinadas por un enfoque sistémico. Las operaciones de corazón abierto incluyen el aporte de muchas técnicas médicas diferentes: anestesia, circulación extracorpórea, técnicas quirúrgicas, control fisiológico del organismo (presión sanguínea, oxígeno...). Todas ellas deben estar coordinadas mediante una visión global de la situación.

Un *cuarto tipo* de investigación (Gibbon *et al.* Modo 2) es el que se conoce como *investigación en la acción* (*investigación activa*, *action research*). Su origen se encuentra en Kurt Lewin quien criticaba la forma como la “sociología y la psicología tradicional trasladaban a un laboratorio los fenómenos de interés”. Es de anotar que sobre todo en sus comienzos, tanto la psicología como la sociología desarrollaron formas de investigación cercanas a los tipos 2 y 3 arriba indicados. Sin embargo existe una tendencia a considerar la acción investigativa desde un punto de vista interpretativo que Checkland denomina “interpretative action research” (*investigación activa interpretativa*). En este caso el investigador y el proceso investigativo mismo afectan a la situación a ser investigada, en un proceso de toma de decisiones participativo. Investigación y conocimiento se retroalimentan con el fin de mejorar situaciones problemáticas. Esto permite que las propuestas tengan un buen margen de adaptabilidad ante las influencias que ejerce el ambiente. La objetividad es definitivamente abandonada. Evidentemente tanto *F* como *M* deben ser claramente identificados, así como su relación con *A*.

122. El concepto de Jackson de transdisciplina se refiere a que las metodologías sistémicas no surgen de la interdisciplina (esto sería una “suma” de conocimientos según la interpretación de Jackson) sino de características de diferentes disciplinas que originan un patrón para estas metodologías. Sin embargo, el concepto de interdisciplina puede ser considerado de manera diferente. Sería interesante volver a revisar la figura 2.7 propuesta por G. Klir. Se podría decir que las metodologías surgen de un proceso transdisciplinario. Su aplicación genera un proceso interdisciplinario.

Enfatizamos que toda metodología M está subordinada, en general, a una teoría o a una visión de mundo. En los tipos 1 y 2 de investigación, la teoría pertenece a un paradigma oficial. En el tipo 3 la metodología es el vehículo mediante el cual los marcos de referencia son llevados al mundo real; se espera que en este proceso la teoría salga fortalecida. En el tipo 4, la metodología misma forma parte de la investigación y su función principal es aprender de la situación estudiada.

En el capítulo anterior dijimos que si no se dispone de un cuerpo teórico estructurado para aplicar un conocimiento dado, los métodos y sus metodologías asociadas son un camino útil para lograrlo. Pero ¿es posible aplicar conocimientos que no han sido sólidamente establecidos? ¿Cómo llevar a la práctica aspectos cuya comprensión y explicación se nos escapan? Si no podemos medir, por ejemplo la equifinalidad ¿cómo podemos usar este criterio, en la vida real, de una manera científica?

En realidad sí es posible usar y aplicar conocimientos aunque estos no estén aún sólidamente planteados. El campo de la ingeniería nos ha enseñado a hacerlo. Una interesante y atrevida mezcla de conocimiento formal, sentido común, ingenio y osadía. No se necesitó disponer de una teoría perfeccionada de la luz para la creación de aparatos ópticos. Evidentemente, el perfeccionamiento de los mismos, por el contrario, necesita de teorías mucho más estructuradas que aquellas que dieron origen a los primeros artefactos. Recordemos, también, las dificultades que ha enfrentado la Teoría de la Complejidad para su desarrollo al no disponer de definiciones precisas de conceptos tan fundamentales como complejidad y comportamiento complejo, dificultades que, a pesar de todo, no han frenado su avance.

Otra lección que hemos aprendido es la importancia, sobre todo en los sistemas blandos, de los comportamientos como descripciones generales por contraposición a las medidas exactas. La nueva matemática utilizada en los sistemas destaca este hecho.

9.2 Principios básicos de una metodología sistémica

Cualquiera que sea la metodología que se vaya a aplicar a una situación del mundo real que pertenezca a los sistemas de la actividad humana, ésta debe

cumplir ciertos criterios sin los cuáles ella tendría muy poco valor práctico. Son sus principios generales.

El primer reto es la *definición del sistema en estudio*. Ya hemos discutido el tema anteriormente y sabemos que, aun partiendo de la definición operativa, dos personas ajenas la una a la otra, pero conocedoras de los conceptos teóricos de los sistemas, en general identificarán y definirán de forma diversa al sistema en cuestión, fundamentalmente cuando se trata de sistemas de la actividad humana. ¿Porqué las diferencias?

Toda definición (concepción) de un sistema tiene dos aspectos. Uno *externo*, el cual se refiere a la situación en consideración, y otro *interno*, referente a la persona que lo define. El primer aspecto es “el sistema”. El otro surge cuando la persona “limita” el sistema que va a considerar. Cada cual con sus conocimientos, su cultura, su idiosincrasia, su idioma, aplica las nociones sistémicas y decide qué incluir y qué excluir¹²³. Esto no es ninguna novedad en la ciencia, sólo que para el caso de la físico-química, si bien no es un asunto trivial tal escogencia, cuando esta delimitación se descubre, es única. El sistema se vuelve idealmente descomponible. O en términos más precisos, es posible encontrar un modelo ideal, descomponible *intrasistémicamente*, que pueda explicar muchos fenómenos relacionados que no son ideales, pero que son modelos de sistemas cuasidescomponibles.

Un segundo aspecto metodológico es la consideración de la *jerarquía de los sistemas*. Ya hicimos referencia al problema que se presenta con los “dos sistemas extremos que no parecen ser sistemas”. Independientemente de esta situación, todo sistema que se identifique como tal está relacionado con los supra y subsistemas que son parte de su jerarquía. Toda metodología debe considerar la forma de cómo utilizar la casi-descomponibilidad *intrasistémica* e *intersistémica* con el fin de delimitar los *subsistemas* y el *ambiente* del sistema (suprasistema). Es decir, la metodología debe lograr un “aislamiento” del sistema, una “ruptura” de la jerarquización, ruptura que, por las características ya indicadas de los sistemas cuasidescomponibles, no afecte sustancialmente el comportamiento del sistema que queremos definir.

Una tercera consideración es que toda metodología debe indicar la manera de identificar las relaciones existentes entre los elementos del sistema y los del

123. Por ejemplo, una concepción como sistema de una situación donde la nieve intervenga, será muy diferente entre un latino cercano a la línea ecuatorial y un sueco, ya que estos distinguen diferentes tipos de nieve.

ambiente con el fin de especificar las influencias respectivas y medirlas si es posible o al menos cuantificarlas.

Como cuarta característica, la metodología debe generar modelos que sirvan para estructurar, comprender y proponer acciones que puedan mejorar situaciones que deseen modificarse.

Finalmente, deben ser cíclicas, es decir, que las fases o pasos sugeridos no sean una secuencia rígida a seguir; por el contrario, debe existir una interacción entre ellos, modificándose las acciones y proposiciones a medida que se avanza en la solución del problema. Esta característica establece una clara diferencia entre método y metodología.

Ackoff (2002, p. 17-18) diferencia al pensamiento analítico y al sistémico de acuerdo con sus métodos de la siguiente manera:

En el pensamiento analítico, el objeto por explicar se trata como un todo que debe separarse. En el pensamiento sistémico la cosa por explicar se trata como una de las partes de un todo contenedor. El primero *reduce* el centro de atención del investigador; el segundo lo *expande*.

Una visión es la de un todo contenedor; la otra, la de un todo contenido.

9.3 Características generales de los cuatro tipos de metodologías según Jackson

A estas alturas vale la pena hacer referencia a cuatro tipos de metodologías que intentan abarcar el campo de la investigación particularmente en los sistemas sociales: la funcionalista, la interpretativa, la emancipadora y la postmoderna (Jackson, 2000, p. 11). Cada una de ellas tiene sus propias herramientas, técnicas, modelos y métodos.

Esta clasificación se basa en la demarcación, indicada en la figura 9.2, de los cuatro paradigmas propuesta por Burrell y Morgan (2009, p. 22).

No se intenta sugerir que las teorías sociales caen en uno de estos cuatro compartimentos. Lo más común es que ellas tengan, en mayor o menor medida ciertas características de otros movimientos.

Los cuatro paradigmas del análisis de las teorías sociales

Fig. 9.2

Es simplemente una ayuda para distinguir algunos movimientos sociológicos, que consideran que sí es posible desarrollar sistemas sociales objetivos y que impliquen cambios radicales, por contraposición, por ejemplo, con teorías sociales que enfatizan lo subjetivo y la imposibilidad de establecer regulaciones (sociedades controladas por autoridades o ideas superiores).

La inclusión de la Sociología como ciencia, en temas referentes a la T.G.S. tiene como fundamento el hecho que, desde la perspectiva de ciertos autores, una y otra se han influido notablemente.

Como caso concreto consideremos las propuestas de N. Luhmann. El enfoque de este autor sobre la T.G.S. indicaba que el concepto funcionalista de sistema abierto –en donde los fines, los objetivos y los métodos para lograrlos, son predefinidos de antemano– tal como T. Pearson lo había propuesto para la sociología, no era suficiente para explicar toda la complejidad de este tipo de sistemas.

Luhmann (1995) incorpora dos conceptos a la sociología: los sistemas auto-referenciados y autoorganizados, tomados de la T.G.S. y de la cibernética de segundo orden de H. Von Foerster y la autopoiesis, de H. Maturana-F. Varela (los sistemas autogenerados).

Para Maturana la ciencia no explica el mundo de manera independiente; explica la experiencia del observador. No hay realidad objetiva, tal como se indicó en el numeral 1.1.2.

De estas ideas Luhmann obtiene la propuesta de una sociología estudiada por un observador que mira en forma integrada a la sociedad, mediante el conocimiento pero que, durante este proceso, no se aclaran los esquemas de distinción. Tales esquemas son observados por otro observador, que presenta la misma dificultad. Entonces él es observado a su vez... en una cadena que no tiene como final un gran observador que pueda poseer la verdad absoluta.

Para H. Maturana los sistemas vivos se autorreproducen y su comportamiento social es fruto del comportamiento individual, egoísta, de sus componentes, tal como se estudió en la Teoría de la Complejidad. Luhmann toma estas ideas para explicar el proceso de humanización el cual surge de una red cerrada de comunicación. Fuera de esta red no existe comunicación. Ella contiene el concepto de sociedad. Lo social no depende del hombre. Es una propiedad emergente de la red cerrada de comunicación.

9.3.1 Metodologías funcionalistas

Desde la perspectiva funcionalista de los sistemas, se parte de que la metodología está garantizada gracias al soporte teórico F existente. La forma de investigar cae en el modo 1. El sistema aquí toma un carácter de realidad. El marco teórico intenta definirlo de una única manera independientemente de quien estudie el sistema.

Estas metodologías se caracterizan por:

- Tener un soporte teórico basado en el funcionalismo, siguiendo las reglas de la ciencia clásica, con un enfoque cuantitativo, matemático, considerando el sistema como algo real, utilizando métodos, modelos, herramientas y técnicas con el fin de conocerlo y manipularlo para mejorarlo.

- La intervención del sistema tiene como objetivo buscar la mejor manera de lograr las metas, mediante procedimientos sistemáticos, buscando la eficiencia (¿se utilizaron los recursos escasos al mínimo?) y la eficacia (¿se lograron las metas?) en los procedimientos.
- Se busca fortalecer tanto a la teoría que enmarca la metodología, como la metodología misma.

Como metodologías de tipo funcionalista podemos citar:

- Las teorías basadas en el movimiento organicista (la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy, el pensamiento de sistemas de Barnard, la teoría de la contingencia, la teoría de los sistemas socio-técnicos).
- Las teorías basadas en los sistemas duros (Investigación de Operaciones, Análisis de Sistemas, Ingeniería de Sistemas).
- La Dinámica de Sistemas. (La teoría y metodología de J.W. Forrester).
- La cibernética organizacional. (El sistema viable de S. Beer).
- La metodología de Jenkins (“Four ‘M’s Methodology”).
- La metodología sistémica de G. Klir.
- La teoría de los sistemas vivos.
- La teoría de la autopoiesis.
- La Teoría de la Complejidad.

9.3.2 Metodologías interpretativas

El enfoque interpretativo –o enfoque de los sistemas blandos– privilegia la percepción, los valores, las creencias y los intereses por encima de los aspectos tecnológicos; acepta la multiplicidad de puntos de vista; busca acuerdos entre ellos con el fin de favorecer al sistema. El subjetivismo es aceptado como parte del proceso, y esto constituye otra diferencia fundamental con el funcionalismo, que clama por la objetividad como base del conocimiento científico. Este enfoque no busca hallar la “verdad” sobre los sistemas, sino más bien una “explicación” de las diferentes cosmovisiones. Los sistemas de su interés tienen propósitos en lugar de metas regidas por leyes externas, fuera del control del sistema. Aquí la metodología se destaca en importancia: se privilegia *M*

sobre *F*. El sistema es lo percibido, lo comprendido a partir de una visión de mundo particular; no se busca la naturaleza real del sistema. Los individuos tienen libre albedrío, capacidad de decisión. Sin embargo, tienen en común con el funcionalismo la búsqueda de mecanismos de control para mantenerlo centrado en sus objetivos (propósitos) básicos.

Como características comunes a este tipo de metodologías se destacan:

- La búsqueda de mejorar la situación problemática teniendo en cuenta sus diversas percepciones, ya que se aplican en los sistemas de la actividad humana.
- Las ideas de sistemas son usadas como constructos mentales, es decir, el sistema como tal no existe.
- La situación problemática se estudia de manera creativa y no siguiendo esquemas estrictos, aunque no excluye la opción de modelos cuantitativos, todo lo anterior buscando obtener cambios factibles y deseables.
- El proceso de intervención es sistémico y no tiene un final definido y tiene como finalidad aliviar las sensaciones de inconformidad de la situación problemática y generar un aprendizaje individual y colectivo.
- La intervención se logra a través de las personas afectadas por la situación problemática; los cambios deben evaluarse con base en la efectividad, la elegancia y la ética.
- Como estos enfoques interpretativos buscan obtener hallazgos en los procesos investigativos así como cambios en la situación estudiada, se debe fortalecer la teoría que enmarca la metodología, así como la metodología misma, sus métodos, modelos, herramientas y técnicas.

Pertenecen a metodologías de tipo interpretativo:

- La administración interactiva de Warfield (IM).
- El diseño de sistemas sociales, de Churchman.
- La teoría de Mason y Mitroff (Metodología SAST).
- La Ciencia Social de Ackoff (S3). La planificación interactiva.
- La metodología de sistemas blandos de Checkland. (SSM).
- La teoría de sistemas blandos de Senge (La quinta disciplina).

- La Investigación de Operaciones, la Dinámica de Sistemas y la cibernética de sistemas blandos.

9.3.3 Metodologías emancipadoras

El enfoque emancipador de los sistemas puede considerarse como un movimiento de cambio social. Busca emancipar a las clases sociales oprimidas, dominadas, discriminadas por el orden social vigente mediante un cambio radical, creando un nuevo orden social en el cual los opresores también pueden tener algunos beneficios. El proceso es de “desenmascaramiento” de los principios y valores que hacen que estas diferencias existan. La posibilidad del cambio se basa en las contradicciones ideológicas y de poder que se hacen presentes para mantener el status del sistema.

Este movimiento social tiene visiones de un mundo mejor basado en las sociedades sin clase, un mundo en el cual exista una armonía entre los seres humanos y la naturaleza y en donde las personas sean libres de determinar su futuro sin que sea influido o forzado por el poder de turno. Podríamos estar pensando en un movimiento tipo Marxista. En este sentido, Jackson hace notar que existen en efecto, dos corrientes. Por una parte las líneas de Kant, Hegel, Marx, Habermas: la emancipación viene de un movimiento colectivo, social. Por otro lado las ideas de Kant, Nietzsche, Heidegger, Foucault; aquí se busca la autoemancipación, es decir la emancipación del individuo. La primera puede considerarse objetiva, ya que el proceso emancipador se logra mediante el cambio de la estructura social y política de la sociedad. La segunda sería subjetiva.

Los aspectos comunes son:

- Considera a los sistemas como entes reales, utilizando métodos, modelos, herramientas y técnicas basadas en los conceptos de sistemas.
- Supone que los sistemas existen como forma de alienar y oprimir a grupos sociales definidos.
- Estudia las relaciones entre los que están en ventaja con respecto a los que no lo están, buscando arreglos, mediante una visión sistémica, para aliviar la tensión.

- Los modelos son utilizados como herramientas para ilustrar a los explotados y oprimidos con el fin de que adquieran conciencia de su situación.
- Se usan análisis cuantitativos cuando sean posibles.
- El proceso de intervención es sistémico y tiene como objetivo mejorar la situación problemática para los explotados y oprimidos, buscando que los afectados tomen conciencia de que la liberación es de su propia responsabilidad.
- Aquí se busca que los cambios se hagan bajo aspectos éticos y emancipadores.
- Se busca fortalecer tanto la teoría como la metodología misma.

En este grupo de metodologías podemos citar:

- Las teorías emancipadoras como liberación: Las vertientes críticas de la I. de O. y la ciencia de la administración, la propuesta de Habermas, la sistemología interpretativa, la pedagogía crítica de Freire, MacIntyre y la comunidad moral, la sostenibilidad ecológica de Capra.
- Las teorías emancipadoras a través del uso de la racionalidad discursiva: El grupo de integridad de Beer, la crítica de la heurística de los sistemas de Ulrich, la teoría y la práctica de la crítica de frontera.
- Las teorías emancipadoras a través del uso indirecto de métodos sistémicos.

9.3.4 Metodologías postmodernas

El cuarto tipo de movimiento sociológico es el denominado postmoderno. También busca que las voces marginales sean escuchadas. Su origen es similar al movimiento emancipador, pero aquí, el mundo es un complejo de patrones que cambian continuamente debido a la vida misma... Cambio y novedad, orden y desorden... En lugar de buscar un sistema ideal como el movimiento emancipador, se busca promover la novedad y el desorden. Pueden surgir sistemas altamente organizados sin necesidad de elementos reguladores, impositivos. Estos movimientos critican los "sistemas teóricos" que intenta abarcar una gran cantidad de situaciones bajo una misma mirada: son los sistemas filosóficos de Aristóteles, Kant, Hegel..., o los sociológicos como Comte, Weber..., o las

teorías económicas tipo Pareto, Smith, Ricardo... No se trata, según algunos autores, del interés en la búsqueda de un patrón que rija el aparente desorden, como sería la visión desde el punto de vista de la teoría del caos. Es el desorden mismo. Para ser auténticos debemos enfrentarnos al hecho de nuestra propia existencia y hacer de ella lo que queramos. La existencia precede a la esencia.

Las ideas discutidas con respecto a la Teoría de la Complejidad arrojan luz sobre la forma como este tipo de propuestas podrían llevarse a cabo. Los agentes independientes, unidos por reglas sencillas, han demostrado como pueden autoorganizarse. Y esto es lo que, en esencia, esta corriente trata de subrayar: la independencia individual como base de un sistema social.

Son aspectos comunes a estas metodologías:

- Una manera de pensar y actuar acorde con las propuestas del movimiento postmoderno, que enfatiza la ruptura de los problemas del mundo real mediante cuestionamientos críticos de todas las opiniones y formas aceptadas de hacer las cosas.
- La práctica del enfoque de sistemas postmoderno usa ideas sistémicas y antisistémicas como la base de su estrategia de intervención y utiliza frecuentemente métodos, modelos, herramientas y técnicas basadas en el enfoque de sistemas.
- Los sistemas se crean con el fin de establecer clases sociales diferenciadas.
- La intervención busca revelar los procesos y las estructuras que inducen la marginalidad.
- Busca que las voces de los marginados sean escuchadas.
- Se intenta negociar con los explotadores.
- Los análisis cuantitativos son rechazados, salvo si forman parte de un proceso de deconstrucción.
- La intervención busca exponer los conflictos.
- Juega papel importante la emoción y la ética.
- Se busca fortalecer los principios teóricos que enmarcan la metodología, como la metodología misma.

Hemos indicado con anterioridad que el marco conceptual de los tipos de investigación 3 y 4 es el enfoque de sistemas, el cual está íntimamente inte-

rrrelacionado con los movimientos sociales antes descritos. Como nuestro objetivo fundamental son los sistemas de la actividad humana, y en concreto, los aspectos administrativos que la Teoría General de Sistemas ha aportado en este campo, consideremos ahora algunas de las ideas que C. W. Churchman tiene al respecto con el fin de darle un contexto al enfoque sistémico en la administración, que sirva como guía general a las metodologías sistémicas con ella relacionadas.

9.4 Las ideas de C. W. Churchman

Churchman (1976) hace referencia a cuatro estilos de administración cuando se considera en ellos la manera de *enfocar al sistema*, es decir cuando se miran a través de la forma como el concepto de sistema es utilizado: 1) los *eficientes*, 2) los *humanistas*, 3) los *científicos*, y 4) los *opositores* (o anárquicos).

Los primeros son los administradores que basan sus decisiones en las teorías de Fayol y Taylor. Es la administración basada en la eficiencia (surgen los expertos en eficiencia con su herramienta básica: los estudios de métodos y tiempos (o tiempos y movimientos) y parte del principio que siempre hay una manera mejor de hacer las cosas. Aseguran que el enfoque más eficiente del sistema es la identificación de las áreas problemáticas y en especial en los lugares donde hay desperdicio, por ejemplo costos elevados innecesariamente, para luego proceder a eliminar la ineficiencia.

Como reacción a esta escuela surgió la de los humanistas, en la cual se privilegia la importancia del ser humano como tal, por encima de su eficiencia¹²⁴. Aquí el enfoque del sistema se centra en los valores humanos: libertad, dignidad y privacidad. Por encima de todo, sostienen que este enfoque deberá evitar la imposición, por ejemplo, de planes de cualquier tipo de intervención.

El tercer estilo, el de los científicos, no debe confundirse con la administración científica, que fue uno de los nombres con que se conoció la escuela basada en la eficiencia de la producción. Los científicos de la administración favorecen el empleo de la ciencia para llegar a un sistema, construir un “modelo” que describa perfectamente su funcionamiento. Se utiliza la matemática, la economía

¹²⁴. Se destaca el estudio llevado a cabo en la fábrica Hawthorne de Chicago: cuando el personal es considerado de forma especial, se logra una mayor conciencia de grupo y se eleva el entusiasmo y la moral, lo cual mejora la productividad. Elton Mayo fue el líder de este movimiento.

o las Ciencias del comportamiento humano (sicología, sociología...). Es el enfoque de sistemas aplicado a la administración.

Por su parte, los opositores aseguran que no es posible una teoría de la administración; que gran parte de este proceso se da sobre la marcha. El administrador debe estar en capacidad de adaptarse a los cambios y tomar las decisiones que considere las más acertadas utilizando la astucia y la experiencia. Según ellos cualquier intento de establecer planes específicos y racionales es ingenuo y peligroso. El verdadero “enfoque” del sistema es vivir el sistema, reaccionar en términos de la experiencia de una persona y no tratar de modificarlos mediante un “esquema grandioso” o un modelo matemático. El “líder” nace, no se hace. Podríamos considerar aquí el tipo de administración que llevan a cabo quienes, siguiendo las líneas de la T.C. administran a los sistemas “al borde del caos”.

Es fácil ver la estrecha relación entre esta clasificación de Churchman y los cuatro tipos de metodologías antes descritas.

En lo que sigue nos centraremos en la visión del enfoque de sistemas científico. En esta visión, contraria a la de la teoría clásica que considera a las organizaciones como sistemas cerrados, el sistema es abierto.

En el uso del enfoque de sistemas en el área administrativa, Churchman propone que para que un sistema cumpla con un plan dado es necesario incluir como un componente las actividades que determinan el objetivo general y la justificación de cada uno de los subsistemas, además de ciertas *medidas de actuación* (que miden la capacidad de los subsistemas para llevar a cabo una función dada), y los estándares en términos del objetivo general. De esta manera el conjunto completo de subsistemas, incluyendo al ambiente, sus planes, y sus medidas de actuación constituirán un *enfoque de sistemas* del problema a resolver. El objetivo general prevalece de tal forma que los demás elementos del sistema deben obrar conforme a él, y los grados de actividad de los subsistemas son considerados a través de las medidas de actuación en cada caso.

Un subsistema inherente a todo sistema administrativo es el *subsistema administración*. Surge espontáneamente como necesidad de un elemento centralizador. Es el subsistema que considera el plan general. Éste puede llevar un monitoreo y un control continuo sin esperar que se presenten las crisis. Cada paso del plan se justifica en términos del objetivo general, lo cual no implica que el proceso sea rígido y cerrado. Poseer un objetivo (u objetivos) definido y que tenga interrelaciones claras con los subsistemas, permite tomar decisiones sobre la marcha en formas acertada.

Toda metodología sistémica, como hemos visto, debe incluir la manera de definir o identificar los siguientes elementos. Se enumeran aclarando que no están en un orden predeterminado. De alguna manera, todos ellos operan simultáneamente, “sistémicamente”. Utilizaremos la visión de Churchman para ampliarlos.

- 1) La definición de los objetivos del sistema, considerado como un todo, y específicamente, sus mediadas de actuación.
- 2) El ambiente del sistema y las restricciones fijadas.
- 3) Los recursos del sistema.
- 4) Los subsistemas o componentes del sistema, sus actividades, metas y medidas de actuación.
- 5) La administración del sistema.

9.4.1 Los objetivos del sistema

Un hecho que debe tenerse en cuenta es saber que no es fácil hallar los verdaderos objetivos de un sistema. A menudo existen declaraciones sobre los fines de una organización, pero en el fondo tales fines no son los verdaderamente considerados. Muchas empresas y dependencias gubernamentales denominan a estas declaraciones generalmente vagas, objetivos. Pero para el científico éstas son obviamente imprecisas y, por lo tanto, engañosas. La prueba de fuego para conocer si una declaración dada es uno de los objetivos del sistema, consiste en conocer si el sistema, con pleno conocimiento, tiene la determinación de sacrificar otras metas para poder lograr ese objetivo. Cuando una entidad declara que su objetivo es la protección de sus afiliados pero no está dispuesta a invertir más dinero en su bienestar social porque disminuiría su margen de utilidades, queda claro que el objetivo económico prima sobre el de bienestar. Churchman (1976, p. 49) ejemplifica:

Un error común al señalar objetivos es recalcar lo que es obvio. Por ejemplo, considérese un laboratorio médico en donde se examinan las muestras que los doctores les envían. ¿Cuál es el objetivo del laboratorio? Una respuesta obvia es que el objetivo es hacer un examen lo más exacto posible. Pero el verdadero objetivo no es la “exactitud”, sino para qué sirve la exactitud: mejorar el diagnóstico del doctor. Una vez que vemos hacia adelante el resultado concreto y deseado, dice el científico, entonces podremos preguntarnos a nosotros mismos cuán importante es realmente el objetivo. En algunos casos, mejorar la exactitud puede superar el costo de su obtención, o sea, el sacrificio de otros objetivos.

9.4.2 Medidas de actuación

Para ser precisos en la definición de los objetivos es necesario dar una *medida de actuación* del sistema. Churchman ejemplifica esto diciendo que no es una sorpresa que después de un cuidadoso estudio de colegios y universidades se encuentre que la verdadera medida de actuación no está en función de la educación sino en función del número de estudiantes que se gradúan.

¿Cómo medir la actividad investigativa en las universidades? ¿Y la extensión? La búsqueda de medidas de actuación, coherentes y precisas, es una valiosa herramienta para identificar el objetivo u objetivos del sistema. Como veremos más adelante, esto es válido también cuando consideremos los subsistemas y sus actuaciones.

Una buena medida de actuación debe ser sistémica. Es posible que en una empresa se desee comprar, bajo ciertos parámetros de calidad, un tipo dado de materia prima por ser más económica; la medida de actuación (o índice de medida) es en principio clara. Sin embargo, es posible que bajo ciertas circunstancias este tipo de material falle, dañando la imagen del producto. Un criterio superior sería tener en cuenta no sólo el costo del material, sino la pérdida de clientela por estas fallas que puedan minar la calidad del producto.

En los sistemas de la actividad humana las medidas de actuación son a menudo de difícil definición y aplicación. Bástenos citar las notas asignadas a los exámenes y las implicaciones sociales, económicas y de autoestima que esto trae. Se debe ser muy consciente en su uso y aplicación, pero es necesario indicar que son absolutamente necesarias para conocer si el grupo de estudiantes está

cumpliendo el objetivo propuesto por la facultad respectiva o por el profesor en particular.

9.4.3 Ambiente del sistema

Como ya lo hemos indicado, todo sistema forma parte de un sistema mayor. Por lo tanto, hay algo que “envuelve” al sistema. A este suprasistema (o sistema ampliado) se le conoce con el nombre de *ambiente del sistema*.

El ambiente, al ser el proveedor de recursos fundamentales para el sistema, lo determina en su operación: da “vida” o “muerte” al sistema. En algunos casos el ambiente se determina fácilmente si cambios en los elementos del ambiente modifican a los del sistema, pero cambios en los elementos del sistema no ejercen influencia importante en los elementos del ambiente. Para el caso de los sistemas abiertos, y principalmente para los con propiedades emergentes, el sistema ejerce influencia y modifica al ambiente. Aquí es la consecución de recursos no generados por el sistema, pero que son metabolizados por el mismo, lo que establece la diferencia entre los elementos que forman parte del sistema, y los del ambiente. Incluso se ha llegado a proponer, como medida de la inteligencia de un sistema, el cociente entre la capacidad que tiene un sistema para controlar a su ambiente y la que el ambiente tiene para controlarlo.

9.4.4 Los recursos del sistema

Estos forman parte del sistema. Son los medios de que él dispone para llevar a cabo sus procesos. Pueden ser modificados por el sistema en su propio provecho. Se miden generalmente en dinero, horas-hombre, equipo, capacidad de trabajo, etc.

Debe hacerse un balance muy cuidadoso de los recursos. No es una simple enumeración que se convierte rápidamente en historia pasada, ya que puede transcurrir un tiempo prudencial entre el estudio y el conocimiento del sistema. Además, tales listas de recursos no consideran situaciones tan importantes como la disponibilidad de personal en términos de la educación y capacidades individuales. Tampoco hay una historia de las experiencias pasadas. No debe desdeñarse la importancia del error y las equivocaciones, “verdaderas lecciones

sobre oportunidades perdidas, las causas de los fracasos, la deficiencia en el uso de los recursos”. Es necesario construir un sistema de información con un enfoque administrativo en donde asuntos como los relacionados sean tenidos en cuenta.

Un expendio de venta de gasolina tenía, entre sus empleados de servicio, uno que había tenido que abandonar la carrera de ingeniería ambiental, faltándole pocos semestres para terminar. La empresa tuvo que llevar a cabo un estudio sobre el impacto ambiental de este tipo de negocio y perdió, por desconocimiento, una valiosa ayuda.

También son recursos los desarrollos tecnológicos. No es conocer bien lo que se tiene sino la forma en que estos recursos puedan aumentarse o modificarse con el fin de que puedan ser utilizados para crear mejores medios en el futuro, bien sea a través de la investigación y desarrollo de equipos o tecnologías, o mediante el entrenamiento y la educación del personal.

9.4.5 Los subsistemas

Son las partes o elementos que llevan a cabo las acciones necesarias para alcanzar los objetivos del sistema como un todo y utilizan para ello los recursos del mismo.

Estos componentes deben estar íntimamente relacionados con el sistema. Se dice que en la Teoría de Sistemas, es el sistema el que define las partes y no éstas al todo. El enfoque tradicional nos enseñó que el todo está determinado y explicado por las partes. Sin embargo, en los sistemas organizacionales esta visión lleva inevitablemente a visiones equivocadas de muchos aspectos administrativos. Desde esta perspectiva, los componentes de un sistema organizacional no son los que la división funcional, tradicional, designa como tal en el caso de las empresas. Por ejemplo, son típicos los departamentos de producción y de mercadeo de una empresa industrial. No obstante, el proceso de distribución no es función sólo del departamento de mercadeo. En muchas empresas la función de distribución debe concebirse como parte del componente de producción, ya que es casi imposible imaginarse cómo pudiera ocurrir la distribución del producto de modo independiente de la forma como lo fabrican. También suele ocurrir que muchos departamentos de producción hacen contactos directos con algunos clientes para satisfacer sus pedidos. Es

por esto que el administrador científico piensa en función de *misiones*, *tareas* o *actividades básicas*, como los elementos racionales de las actividades que el sistema debe realizar. Esta identificación por misiones permite definir los componentes del sistema. Obviamente, las reacciones no tardan en hacerse sentir. Como explica Churchman (*Op. Cit.* p. 59):

Puede ser que la matemática y la filosofía sean ampliamente estudiadas y practicadas en todos los campos del aprendizaje, pero *los* departamentos de matemáticas y filosofía definen lo que éstas *realmente* significan, o sea, lo que en realidad son para el verdadero matemático y filósofo.

Para el administrador científico es muy importante hacer de lado las ambiciones políticas y personales que influyen en la delimitación de tal o cual función. Esto obliga a proponer funciones más generales e identificables con las medidas de actuación que permitan conservar la integridad del sistema.

La identificación de estas funciones más generales (o misiones) permite con más facilidad asignar un peso a la actividad en relación con los objetivos del sistema como un todo. Cuando las funciones quedan relegadas a las partes tradicionales (en nuestro ejemplo, los departamentos), no es fácil distinguir cuánto de cada una de ellas es responsabilidad en la tarea total. Se debe disponer de medidas de actuación que permitan evaluar las responsabilidades de cada actor en la consecución del objetivo (u objetivos) global. ¿Acaso las actividades de investigación son analizadas bajo este contexto en nuestras universidades?

Hemos insistido en que debemos mirar el sistema como un todo. ¿Porqué, entonces, la persistencia en definir los subsistemas? La verdad es que no disponemos de herramientas para la comprensión global de los sistemas. Tal vez sea un asunto de nuestra capacidad de comprensión que nos fuerza a mirar todos y partes sin poderlos desligar. Se hace necesario disponer de elementos “individuales” a partir de los cuales obtengamos suficiente información para poder saber si el sistema está actuando en forma correcta. Kant, al decirnos que nuestro cerebro obra con base a tres principios: causalidad, temporalidad y espacialidad, está advirtiéndolo nuestra incapacidad intelectual de percibir los todos de manera natural. La subdivisión se ha hecho tradicionalmente sin tener al sistema como referente, bajo la consideración de aspectos económicos o políticos, o generados por la intuición que genera una visión lineal de las organizaciones. Churchman (*Op. Cit.*, p. 61) analiza de la siguiente manera los asuntos de gobierno:

[...] Desafortunadamente hasta la fecha, en la mayoría de los gobiernos municipales y estatales no existe un análisis adecuado de sistemas del sistema total, en términos de componentes reales; por razones tradicionales, los gobiernos municipales y estatales están divididos en departamentos y divisiones que no tienen relevancia con los verdaderos componentes del sistema. Como consecuencia, dice el científico, la administración de nuestros grandes sistemas de gobierno estatales y municipales, se hace cada año más difícil. Debido a que la toma de decisiones que gobierna las diferentes misiones no está centralizada, las verdaderas misiones del estado, por ejemplo, en términos de salud, educación, recreación, saneamiento, etc. no podrán llevarse a cabo debido a que no tienen administración. Uno de los peligros más graves del diseño de componentes es la rigidez que se ha presentado tan a la medida en el diseño político de las ciudades y estados. La asignación de responsabilidades se fija por ley y resulta imposible quebrantarla. Lo que ocurre es un tipo de endurecimiento de las arterias de la comunicación, y la enfermedad que invade es bastante conocida por los administradores. Aún los planes más obvios para las diversas misiones de la ciudad y estado no pueden llevarse a cabo, simplemente porque no existe ningún camino para destruir la rigidez del sistema que se ha formado por razones políticas.

El análisis de las componentes debe llevarnos a indicar aquellas en las cuales sus medidas de actuación están relacionadas verdaderamente con la medida de actuación del sistema total. Este problema de medir la actuación de un subsistema no es fácil de resolver. Hay dificultades no sólo al nivel de la medición misma sino en la fase que le antecede, en la de decidir cuál es esa medida de actuación, y es aquí en donde se generan conflictos en los objetivos buscados. Si un departamento de una universidad busca la excelencia académica como su objetivo primordial, esto puede reñir con la política presupuestal de la misma puesto que dicha excelencia implica mayor inversión en profesores, equipos y áreas de trabajo. Y el conflicto sería mayor si el objetivo real de dicha universidad fuera producir un mayor número de profesionales. Existe conflicto entre el departamento, la división financiera y la dirección general de la misma universidad.

Una regla que sirve para resolver estas dificultades es la siguiente. Si cuando se aumenta el valor de la medida de actuación escogida, suponiendo que todas las demás cosas permanecen iguales, se observa o deduce que la medida de actuación del sistema total aumenta, entonces la escogencia es correcta y el subsistema está contribuyendo verdaderamente a la actuación del sistema.

De lo contrario, es necesario revisar el subsistema y su comportamiento, así como la medida escogida.

9.4.6 La administración del sistema

La coordinación de lo anterior, es decir, la búsqueda de un equilibrio entre las actividades de los subsistemas y los resultados globales, es lo que se relaciona con la administración del sistema. Un sistema (subsistema) administrativo tiene como funciones la planificación, comunicación, organización y control de los elementos del sistema que administra. Todas estas funciones tienen como finalidad que las partes trabajen coordinadamente para que el todo logre sus objetivos reales. La administración debe establecer las metas de los subsistemas, asignar los recursos y controlar la actuación del sistema¹²⁵.

Surge ahora una pregunta de gran trascendencia. Si el administrador científico llega a un conocimiento tan profundo del sistema que estudia ¿debe ser él, entonces, quien lo administre? El científico, tarde o temprano, se verá involucrado en los aspectos administrativos del sistema, particularmente en los políticos. Tendrá que “negociar” para beneficio del sistema. De alguna forma entrará a formar parte de él. Esta consideración está en la misma base de la imposibilidad de una objetividad en el estudio y tratamiento de los problemas sistémicos. Las metodologías de sistemas que estén relacionadas con los sistemas de la actividad humana deben indicar la forma de afrontar este hecho.

9.5 A guisa de ejemplo

Consideremos una organización que de alguna manera nos es familiar: Una universidad. Intentemos reflejar las ideas expuestas para definirla y tratarla como un sistema. Durante este ejercicio es muy importante tener presente una Institución en particular, no el concepto general de universidad.

Si un arquitecto fuera llamado para que refaccione sus edificios, podría considerar que la universidad como sistema, está definida por lo que se conoce

125. Es importante leer estas notas a la luz de lo discutido en “Complejidad y sistemas sociales”, numeral 8.4. También tener en cuenta lo dicho cuando se analice la metodología de Checkland.

como el “campus universitario”. Aún en el evento de que poseyera sedes en otros lugares alejados, la delimitación sería clara. El ambiente del sistema, en principio, sería todo aquello que, arquitectónicamente, no está en el interior del campus. La definición del sistema y su ambiente es, aparentemente, muy sencilla de lograr.

Como subsistemas consideraría las edificaciones, parques y senderos existentes. En este caso la identificación de los subsistemas, en general, tampoco presenta una gran dificultad.

Como fue llamado para una refacción, el objetivo del sistema es claro: proponer modificaciones a cada una de las edificaciones, de tal forma que guarden cierta armonía entre sí y con la historia de la universidad. Como recursos podemos identificar las condiciones exigidas por el estilo arquitectónico y las autoridades universitarias, el presupuesto disponible, los obreros y sus conocimientos para este tipo de trabajo, el tiempo que se haya fijado para la entrega del proyecto terminado, etc.

Las medidas de actuación del sistema como un todo, podrían ser la exactitud con que la obra final se asemeje a las construcciones originales, el tiempo invertido y el costo de la misma. Para cada subsistema, una medida de actuación similar se puede establecer.

El subsistema administrativo tendrá un subsistema que dependerá del arquitecto y otro de la dirección de la universidad. Ambos deberán estar coordinados para que las fechas, presupuestos y estilos se cumplan a cabalidad.

Como puede verse en este caso podemos decir que el sistema es “duro”: objetivos fácilmente identificables, estructura del sistema claramente delimitable y procesos bajo condiciones de certidumbre.

¿Cuál sería la situación si al arquitecto se le solicitara que modificara la universidad existente con el fin de adaptarla al futuro?

La primera gran dificultad, ahora, es definir con exactitud cuál es el objetivo (u objetivos) de esta nueva universidad. Se dice que este tipo de instituciones debe desarrollar investigación, formar profesionales (docencia) y generar extensión (o servicio a la comunidad). ¿Será la investigación el objetivo primordial? O a pesar de las declaraciones oficiales, ¿quizás lo más importante sea establecer vínculos con la comunidad a través de las asesorías y del servicio social? ¿Y si tal vez lo que se busca es la graduación de un gran número de profesionales que puedan ocupar puestos de importancia con el fin de que la universidad

logre una buena posición en la comunidad? No queda duda que cualquier institución universitaria tiene de alguna manera estos tres objetivos. Pero ¿será alguno de ellos más importante que los otros dos, proyectada al futuro? La aclaración de este punto es de vital importancia si se desea que las nuevas edificaciones cumplan su verdadera función. Por otra parte, ¿hacia dónde va “el futuro” de las universidades?

El ambiente tampoco es claro en este momento. Depende precisamente del futuro. ¿Qué sistemas de comunicación se prevé? ¿Cómo afectarán a la docencia? Situación igual se presentará al tratar de definir los componentes (subsistemas) del sistema, los recursos y el subsistema administrativo. El sistema debe considerarse como uno “blando”.

9.6 El proyecto metodológico

Es importante establecer una distinción entre el desarrollo del estudio de sistemas como *ciencia de los sistemas* –es decir– como el establecimiento de sistemas formales con profundos arraigos teóricos, y la *aplicación del pensamiento de sistemas*, que corresponde al campo de las metodologías.

Hemos adaptado de Jackson y Keys (1984, p. 95) el siguiente esquema general para analizar la evolución del pensamiento sistémico que han denominado *sistema de metodologías sistémicas* (System of Systems Methodologies: SOSM). Éste consta de dos ejes. El eje horizontal está relacionado con las divergencias entre objetivos, valores e intereses de los individuos de un sistema cualquiera. Su rango va desde los sistemas que tienen objetivos claramente definidos y en los cuáles no existe ningún conflicto de intereses entre quienes están relacionados con la situación problemática a analizar, hasta aquellos en los cuales los conflictos y luchas de poder son dominantes. El eje vertical está relacionado con la complejidad de los sistemas. El rango va desde los sistemas más sencillos (pequeño número de elementos, interacciones claramente identificables, decisiones cuyos efectos son predecibles, es decir, sistemas duros), hasta los más complejos fruto de procesos jerárquicos más evolucionados. La figura 9.3 nos da una idea de este *sistema de sistemas*.

De acuerdo con este esquema, la Investigación de Operaciones (I. de O.) –aquellas técnicas matemáticas utilizadas para la optimización de procesos en

las organizaciones– tiene su origen y ha sido exitosa en los sistemas “duros”, en los cuales el acuerdo y definición de los objetivos no tiene dudas.

Más aún, estas metodologías presumen, en la mayoría de los casos, un objetivo único. Esto lo veremos cuando presentemos la programación lineal y la metodología de Jenkins (Cap. 10). Sin embargo, a medida que los sistemas estudiados se fueron haciendo más complejos, se necesitaron nuevas herramientas. La Dinámica de Sistemas, (de la cual hablaremos en el capítulo 10), la cibernética organizacional y la teoría de los sistemas vivos son ejemplos de tendencias hacia estos nuevos campos, los cuáles han pasado de una propuesta que puede enmarcarse como positivista (es decir, reduccionista y mecanicista) a una

Fig. 9.3

propuesta enmarcada en los movimientos estructuralistas de enfoque más holístico. En lo que respecta al eje horizontal, ya indicamos que la I. de O. parte de la base de la no existencia de conflictos desde el punto de vista de valores e intereses (o, por lo menos, se aceptan acuerdos sobre estos temas que son debidamente respetados).

A medida que el grado de acuerdo empieza a desaparecer se hace necesario modificar las metodologías. Surge entonces la I. de O. “blanda” que debe tener en cuenta los conflictos entre objetivos. Una primera aproximación a ellos es la programación de metas, que logra la consideración simultánea de objetivos en pugna. Aquí se propone una *única* función objetivo que incluye las discre-

pancias entre las metas; la idea es minimizar tales discrepancias (se reducen los diversos objetivos a uno sólo, con el fin de poder utilizar el software de la programación lineal). También se incluye en esta parte las denominadas metodologías de sistemas blandos (administración interactiva (Warfield), planeación interactiva (Ackoff), diseño de sistemas sociales y la Metodología de Sistemas Blandos (Checkland)). Estas nuevas tendencias buscan un enfoque *interpretativo*. Ya no se trata de buscar un modelo que pueda repetidamente ser utilizado. Para el caso de sistemas en los cuales los conflictos de intereses son realmente determinantes, la tendencia deriva hacia un *enfoque emancipador* de los sistemas.

Podríamos decir, adicionalmente, que los modos de investigación se localizarían de lo simple a lo complejo y de lo unitario a lo conflictivo, en el orden tipo 1, tipo 2, tipo 3 y tipo 4. De esta manera, lo simple y unitario utiliza el tipo 1, mientras que lo complejo y coercitivo el tipo 4.

En los capítulos que siguen indicaremos algunas metodologías con el fin de ilustrar la manera cómo los conceptos de sistemas han sido considerados y llevados a la práctica por los diferentes investigadores de los sistemas.

9.7 Resumen

En nuestro camino por explicar la T.G.S. nos hemos encontrado con la dificultad de disponer de teorías que permitan aplicarse directamente a los sistemas de la actividad humana. Ante este hecho, la solución que se ha encontrado es recurrir a las metodologías.

Una metodología es una forma general de explicar cómo enfrentar situaciones complejas cuando no existe un cuerpo de doctrina que permita guiar nuestros pasos. Si se aplican a situaciones concretas, entonces ellas se tornan en métodos, formas específicas de enfrentar la situación que queremos mejorar. Si alguno de estos diversos métodos resulta ser más conveniente que otros, entonces habremos desarrollado una técnica. La relación entre los marcos teóricos y el mundo real que queremos conocer o afectar, estará mediada por metodologías. De esta interacción surgen diversas maneras de hacer investigación: son las que hemos llamado investigación tipo 1, tipo 2, tipo 3 y tipo 4.

Respecto a las metodologías hemos utilizado la clasificación propuesta por Burrell y Morgan de los sistemas sociales. Cuatro visiones enmarcan esta ca-

tegorización: la primera, tiene que ver con sistemas que no pueden mirarse en forma objetiva (subjetivos) y no son regulables (cambio radical), a los que denominan “humanismo radical”. La segunda, se refiere a aquellos sistemas que se consideran subjetivos, y no obstante regulables: los denominan “interpretativos”. La tercera visión, considera a los sistemas como objetivos pero no regulables, los cuales dan origen a teorías sociales de tipo estructuralista o “estructuralismo radical”. Finalmente, existen teorías sociales que consideran que la sociedad puede estudiarse objetivamente y es posible regularla; se trata de enfoques “funcionalistas” que siguen las ideas de la ciencia tradicional.

Cada una de las metodologías desarrolladas con la clasificación indicada, se caracterizan por la forma de considerar el concepto de sistema, las teorías científicas que las soportan y los efectos que la intervención ejerce sobre el fenómeno estudiado.

Al final de este capítulo, se muestra un diagrama que traza un proyecto de la manera como se espera que nuevas teorías y metodologías se vayan desarrollando con el fin de pasar de la consideración de sistemas fácilmente definibles en sus objetivos y sencillos en cuanto a sus interacciones, a sistemas altamente conflictivos y de gran complejidad.

CAPÍTULO 10

METODOLOGÍAS DURAS

10.0 Tres metodologías funcionalistas

Estudiados los conceptos generales de cualquier metodología, en este capítulo se considerarán algunas metodologías funcionalistas: la programación lineal, la 4M de Jenkins y la Dinámica de Sistemas de Forrester.

La primera es la programación lineal, enmarcada en los procesos metodológicos de la Investigación de Operaciones. La segunda es la de G.M. Jenkins, enraizada en lo que se conoce como Análisis de Sistemas pero en la cual un enfoque sistémico es tenido en cuenta. Finalmente, se presenta la metodología de J.W. Forrester, nacida de la cibernética y que, durante varias décadas, ha sido ampliamente utilizada en la descripción y estudio de muy diverso tipo de situaciones.

No se intenta presentar estas metodologías de manera exhaustiva. Sólo queremos llamar la atención sobre su existencia e importancia, resaltando sus características principales e indicando las consideraciones que sobre las metodologías hicimos en el capítulo anterior.

10.1 La programación lineal

La Investigación de Operaciones (I. de O.) es el nombre genérico con el cual se conocen diferentes técnicas cuya finalidad es obtener el valor (o valores) que hacen óptimo (máximo o mínimo) un proceso generalmente sometido a restricciones. Tuvo su origen en la segunda guerra mundial en Gran Bretaña; su objetivo era enfrentar mediante un grupo interdisciplinario de científicos, los ataques alemanes y desarrollar mecanismos de defensa. Fue muy exitosa y al terminarse esta guerra, los dos grandes grupos que la conformaron, el Norteamericano y el Inglés, se separaron dando orígenes a estudios relacionados directamente con la Investigación de Operaciones y a lo que se llamó

Management Science. Esta última línea observó que las organizaciones tenían una lucha muy similar a la que se había investigado durante la guerra: la lucha por un mercado. Se habían encontrado un isomorfismos que permitieron adaptar a situaciones empresariales los modelos desarrollados para la guerra.

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la programación lineal, la programación no lineal, la teoría de inventarios, la programación dinámica, la teoría de colas y la teoría de juegos. Se incluye también la simulación de sistemas.

Para mostrar la forma como se analizan los problemas bajo esta perspectiva, tomaremos la herramienta correspondiente a la programación lineal¹²⁶.

El tipo de problemas pertenece a los sistemas duros: el objetivo se presume que es claro, no hay situaciones de incertidumbre y la estructura es claramente identificable; es posible entonces plantear un modelo matemático.

La característica básica de esta herramienta es el hecho de que existe *una* función, que se le conoce con el nombre de *función objetivo*, representada matemáticamente mediante una ecuación lineal, la cual se desea optimizar, es decir, hallarle un valor que sea máximo o mínimo. Entendemos por función lineal aquella en la cual las variables sólo están elevadas a la potencia uno, y no existen productos o divisiones de las mismas (Cfr. 6.0). Son ecuaciones del tipo:

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (10-1)$$

Geométricamente estamos hablando de ecuaciones que se representan en forma de rectas (espacio de dos dimensiones), planos (espacio de tres dimensiones) e hiperplanos (planos más allá de la tercera dimensión). La figura 10.1 muestra, con fondo gris, el plano correspondiente a la ecuación lineal:

$$x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 6 \quad (10-2)$$

para valores de $x_1, x_2, x_3 \geq 0$.

126. Existen muchos y muy buenos libros en la literatura. Autores como Dantzig (que trae un excelente resumen de la historia de la investigación de operaciones) y Hadley deben ser consultados.

Plano en tres dimensiones

Fig. 10.1

Por otra parte, los valores que adquiera la función objetivo están sometidos a restricciones. No pueden moverse libremente. Estas restricciones se representan también por ecuaciones lineales. Veamos un sencillo ejemplo¹²⁷.

El dueño de una tierra posee 25 hectáreas que desea cultivar con tomate y cebolla. Él conoce, por hectárea, los costos de cada cultivo, las necesidades de agua, el abono necesario y el precio de venta. La tabla de la figura 10.2 nos indica los datos respectivos. Desea saber cómo cultivar su tierra con el fin de obtener el máximo beneficio.

Si sólo se sembrara tomate tendríamos que desde el punto de vista del recurso agua, se podrían sembrar, como máximo, $150000/7760 = 19.33$ hectáreas; considerando sólo el abono, el máximo número de hectáreas a cultivar sería de $600/33=18.18$.

Como dispone de 25 hectáreas es claro que el máximo de hectáreas de tomate a sembrar será el mínimo de estos tres números, es decir, 18.18 hectáreas.

127. Para un ejemplo más completo véase C.A. Ossa (2002, p. 89-):

	Tomate	Cebolla	Disponibilidad
Agua m ³ /ha	7760	6080	150000 m ³
Abono kg/ha	33	23	600 kg
Costo/ha	300000	210000	
Precio venta/ha	380000	270000	

Datos de recursos y costos de tomate y cebolla

Fig. 10.2

Un análisis similar para la cebolla nos indica que el máximo número de hectáreas que se puede cultivar es:

$$\text{Min } \{150000/6080, 600/23, 25\} = 24.67$$

En cada caso los beneficios serán:

$$\text{Sólo tomate: } (380000 - 300000) \times 18.18 = 1.454.400.$$

$$\text{Sólo cebolla: } (270000 - 210000) \times 24.67 = 1.480.200.$$

Estaríamos tentados a sugerir que, de la tierra disponible, 24.67 hectáreas se dedicaran a la producción de cebolla por ser la más rentable.

Sin embargo, nótese que podríamos sugerir otro uso de la tierra. Por ejemplo, cultivar 9 hectáreas de tomate y 13 de cebolla. El siguiente cuadro nos muestra que el agua y el abono consumido en esta propuesta no violan las restricciones.

	9 has. tomate	13 has. cebolla.
Agua consumida (m ³)	9×7760 = 69840	13×6080= 79040
Abono utilizado (kg)	9×33 = 297	13×23 = 299
Beneficio	9×80000=720.000	13×60000=780.000
Beneficio total	720.000+780.000 = 1.500.000	

Observe que el total de agua utilizada ($69840 + 79040$) es inferior a 150.000 m^3 ; el total de abono utilizado ($297 + 299$) es menor que 600 kg . El área propuesta no excede a las 25 hectáreas disponibles. Esta solución cumple, por lo tanto, con las restricciones. El beneficio total es de $1.500.000$, superior al beneficio de cultivar sólo cebolla.

¿Existirá una solución mejor? La programación lineal nos da la respuesta. Sólo para indicar la clase de modelos que se generan, escribiremos el programa en forma matemática.

Sea x_T el total de hectáreas de tomate a cultivar, y x_C las hectáreas de cebolla. El beneficio por la venta del producto de x_T hectáreas de tomate será $80000 x_T$ y el de la venta de la cebolla $60000 x_C$. Como se busca el máximo beneficio total tendremos el siguiente modelo matemático:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= 80000x_T + 60000x_C \\ 7760x_T + 6080x_C &\leq 150000 \text{ (m}^3 \text{ agua)} \\ 33x_T + 23x_C &\leq 600 \text{ (Kg abono)} \\ x_T + x_C &\leq 25 \text{ (Has)} \\ x_T, x_C &\geq 0 \end{aligned} \tag{10-3}$$

La primera ecuación pide hallar el máximo valor posible. El beneficio total será la suma del beneficio por la venta de tomate, que es 80.000 por el total de hectáreas de tomate producido, x_T , y el beneficio por la venta de cebolla que equivale, para x_C hectáreas de cebolla sembradas, a $60000 x_C$.

La primera restricción se refiere al uso del total del agua: cada hectárea de tomate consume 7760 m^3 de agua por lo que x_T hectáreas consumirán $7760 x_T \text{ m}^3$ de agua. En forma equivalente se calcula el consumo de agua de la cebolla. El total del consumo de agua será la suma de estas dos cantidades y no podrá exceder a los 150.000 m^3 disponibles.

En forma similar se analiza el recurso del abono. La tercera desigualdad indica que no se puede cultivar más de 25 hectáreas (pero sí menos). Las últimas dos restricciones, $x_T \geq 0$, $x_C \geq 0$ indican que no se pueden cultivar hectáreas negativas.

La solución que se obtiene utilizando las técnicas de la programación lineal (el método Simplex) es $x_T = 8.9$, $x_C = 13.3$ con una ganancia de 1.510.830. Para el problema aquí indicado, no existe una solución con mayor beneficio.

Es importante anotar que el óptimo global no se obtiene a partir de los óptimos locales. Esta es una lección de carácter sistémico muy importante. Muchos administradores presionan a sus trabajadores a “rendir al máximo” con la esperanza de que los resultados sean los mejores. Un enfoque sistémico nos demuestra que esto no es así.

Igual ocurre con el uso de la tierra. En este ejemplo, es más beneficioso, desde el punto de vista económico, dejar sin cultivar parte de ella: 2.8 hectáreas.

Los modelos de programación lineal pueden tener muchas variables y muchas restricciones. Nótese que no hay dudas en que existe un solo objetivo: maximizar el beneficio total.

El tipo de problemas que puede resolverse con ésta metodología, a pesar de que los postulados en que se basa son muy restrictivos, es inmenso. Sólo por citar algunos: problemas de asignación de recursos, problemas de producción, problemas de transporte, problemas de inversión de capital, problemas de mezclas, problemas de impacto de propaganda...

Desde el punto de vista metodológico, vemos que la definición del sistema está claramente determinada: hectáreas a cultivar de tomate y de cebolla, expresado por la parte izquierda del sistema de desigualdades (10-3). La relación entre el ambiente y el sistema está expresado en las restricciones que el ambiente le impone al sistema –lado derecho de (10-3)–: disponibilidad de agua y de abono. Las relaciones entre los elementos del sistema están expresadas en el lado izquierdo del sistema de desigualdades. El objetivo es claro: maximizar beneficios. Las medidas de actuación son las hectáreas a cultivar, los recursos utilizados, los costos y beneficios de cada cultivo y el valor del beneficio, tal y como aparecen en el modelo matemático. La administración del sistema buscará que se cultiven las hectáreas propuestas por la solución óptima. Cumple, pues, con las características que debe tener toda metodología tal y como lo discutimos en el capítulo anterior.

10.2 La metodología de G.M. Jenkins

En 1969 G.M. Jenkins publicó un artículo en el cual indicaba una metodología que permitía el uso del enfoque de sistemas en las empresas de tipo hombre-máquina. Estas organizaciones son complejos en los cuales los hombres y las máquinas interactúan mediante un plan¹²⁸. Un enfoque fragmentado, como ha sido el tradicional, no era conveniente debido a la creciente complejidad de las firmas y de los gobiernos locales y nacionales.

La entidad fundamental es el *sistema*. El aspecto a destacar, para Jenkins, es la *existencia de un plan mediante el cual los elementos se conectan formando un todo*. La figura 10.3 representa –de forma esquemática– este tipo de sistema abierto¹²⁹.

La empresa como un sistema abierto

Fig.10.3

Las plantas o empresas en general son un complejo formado por seres humanos y máquinas que forman un todo o sistema. Este complejo puede romperse en subsistemas. La forma en que esto se realice depende de la naturaleza del sistema a ser estudiado y del detalle que quiera lograrse.

Los subsistemas pueden apreciarse gracias a los diagramas de flujo entre bloques, como el indicado en la figura 10.4.

Esta figura es una ilustración propuesta por Jenkins (Op. Cit.) de un diagrama simplificado de una planta de acroleína, que muestra al sistema definido por

128. Se le conoce como la metodología de las 4 M: Men, Money, Machine, Materials.

129. Jenkins establece aquí una diferencia importante con los esquemas utilizados hasta ese momento en los cuales las organizaciones eran vistas como sistemas cerrados, retroalimentados (enfoque cibernético).

Sistema del proceso de producción de acroleína

Fig. 10.4

la interacción de varios subsistemas. El flujo en este ejemplo es de materia y energía. En forma más general los flujos son de dinero, materiales, energía, información y decisiones.

Los subsistemas se pueden definir como algún proceso que transforma ciertos flujos de entrada (dinero, materiales, energía, información o decisiones) en salidas correspondientes. También son sistemas abiertos. De hecho, este tipo de diagramas define al sistema y sus subsistemas, y al ambiente. Estos subsistemas interactúan entre sí buscando que el sistema total cumpla su función de la mejor manera posible. Las salidas de un subsistema son las entradas de otro u otros subsistemas, de la misma manera como Lange define el acople de los elementos activos. La comprensión de tales relaciones es fundamental para entender bien al sistema como un todo.

10.2.1 Las fases de la metodología

El enfoque de sistemas en la solución de los problemas referentes a las empresas hombre-máquina, se puede resumir en las siguientes fases:

- *Análisis del sistema.* El proceso se inicia utilizando el sentido común con un estudio de lo que está ocurriendo, el porqué está ocurriendo y cómo podría hacerse mejor. Deberá entonces definirse el sistema y sus objetivos y recolectarse los datos referentes a las situaciones más probables.
- *Diseño del sistema (o síntesis).* En primer lugar, el comportamiento futuro del ambiente (sistema mayor) deberá predecirse. Luego, se elaborará un modelo el cual se simulará o explicará de acuerdo con las maneras diferentes en que pueda operarse el sistema escogiéndose finalmente la que sea “mejor”, es decir, optimizando el sistema.
- *Realización.* Los resultados del estudio del sistema deben ser presentados para su sanción e implementación. El sistema optimizado debe ser construido. El proyecto requerirá una planeación cuidadosa para garantizar que todos los beneficios del enfoque de sistemas sean logrados. Una vez construido el sistema, deberá revisarse su comportamiento, confiabilidad, etc.
- *Operación.* El sistema debe ser operado por personas diferentes a quienes lo diseñaron originalmente. Por esta razón, se debe ser muy cuidadoso para evitar interpretaciones e ineficiencias en la operación del sistema. Según Jenkins, ésta es el área en la cual probablemente se hace menos hincapié en los proyectos. Posiblemente se deba “afinar” o reoptimizar el sistema para que opere en un ambiente que puede haber cambiado con respecto a aquel para el cual fue diseñado.

Esta metodología tiene algunas características importantes. En primer lugar está diseñada para grupos asesores, quienes deben resolver un problema específico que se les ha encomendado. También está referida a sistemas hombre-máquina; su utilidad es manifiesta cuando se aplica a problemas de carácter industrial y, a veces, organizacional. Finalmente, resume de una manera excelente el pensamiento de diversos autores en el área de la Investigación de Operaciones y del Análisis de Sistemas.

Vamos a describir un poco en detalle las diferentes fases a las que hemos hecho referencia. Es necesario recalcar que no deben tomarse como una sucesión que deba seguirse ciegamente. Son guías del pensamiento que deben ser revisadas continuamente, volviendo atrás cada vez que se crea necesario.

10.2.2 Análisis del sistema

Esta fase incluye los pasos siguientes.

- 1) *Reconocimiento y formulación del problema.* Un hecho que siempre debe mantener presente quien se enfrenta a un problema es el relacionado con la identificación del mismo. Casi como un postulado, se debe partir de la creencia que el problema inicialmente propuesto no es en general el verdadero problema. Y esto es cierto aún en el caso de situaciones que parecen ser de origen marcadamente técnico. Jenkins propone aquí las siguientes preguntas claves:

a) ¿Cómo surgió el problema?

b) ¿Quiénes son los que creen que la situación es un problema?

c) Si es necesaria una decisión superior con respecto a un plan ¿cuál es la cadena de razonamiento que nos lleva a tomar la decisión?

d) ¿Es realmente el verdadero problema? ¿No podría ser la manifestación de otro problema más profundo? ¿No se conseguirían mejores beneficios si se resuelve este último problema en lugar del propuesto originalmente?

Inevitablemente, los recursos a disposición de la empresa son limitados. Con la evidencia disponible hasta este momento ¿se cree que pueda haber una tasa de retorno favorable si se dedican los esfuerzos para resolver el problema? ¿O sería mejor dedicarlos a otra situación?

Como resultado de este diálogo emergerá un cuadro más claro acerca de la amplitud del problema y de los beneficios probables que podrían resultar de su solución.

- 2) *Organización del proyecto del sistema.* Definida la amplitud del problema, es necesario programar la forma como debe ser enfrentado. Se deben especificar las técnicas que van a usarse, lo cual permitirá definir cuáles personas deberán formar parte del grupo asesor. Se deben aprovechar los mejores recursos de que disponga la empresa; y si no están preparados para trabajar como grupo de sistema, será necesario llevar a cabo un programa de entrenamiento al respecto. Un grupo típico está compuesto por todas o algunas de las siguientes personas:

- a) Líder del grupo. Idealmente un experto en enfoque de sistemas o, en su defecto, alguien brillante y con gran conocimiento del problema que va a ser estudiado.
- b) Usuarios. En el grupo es necesario que haya algún representante de la empresa que luego operará el sistema que va a diseñarse.
- c) Constructores de modelos. Ellos se encargarán de la elaboración del modelo y también ayudarán a estimular a aquellos departamentos especializados (investigación, desarrollo de procesos, ventas) que puedan proveer información para los modelos de los subsistemas.
- d) Diseñadores. Si el sistema requiere la construcción de elementos (“hardware”) es necesario que el grupo tenga representantes en el grupo de ingeniería que sea responsable del diseño de estos elementos para que se ajusten a las especificaciones del sistema. Lo mismo para los elementos de soporte (“software”) tales como programas, procesamiento de datos, etc.
- e) Programadores de computación y matemáticos. Para programar los modelos del sistema y ayudar con la optimización del diseño.
- f) Un economista o contabilista. Él suministrará información sobre el ambiente económico general del problema, con lo cual se podrá definir el criterio económico global así como información sobre costos la cual será útil para el modelo.
- g) Ingenieros de sistemas¹³⁰. Ellos contribuirán en mayor o menor grado en la construcción del modelo, en la programación, optimización, evaluación económica y demás actividades que se presentan durante la solución del mismo. En muchas situaciones ellos deberán hacer la mayor parte del trabajo. Pero, por encima de todo, su función es mantener una visión global del desarrollo del proyecto.

También es necesario en esta fase indicar los términos de referencia bajo los cuales se va a llevar a cabo el proyecto. Será necesario asegurarse de que se tienen las mayores garantías en cuanto al acceso a la información que sea requerida.

Finalmente se indicará un cronograma del proyecto. Aquí son de gran utilidad técnicas como el PERT-CPM. Esto permitirá concentrar los esfuerzos en las áreas que realmente sean importantes.

¹³⁰. Jenkins se refiere aquí al tipo de Ingeniero de Sistemas de la U. de Lancaster: un ingeniero con formación en Teoría General de Sistemas.

- 3) *Definición del sistema.* Esta definición es un proceso de análisis en el cual el sistema debe dividirse en los subsistemas más importantes, así como en las interrelaciones entre ellos, lo cual debe quedar indicado en un diagrama de flujo (esquema de bloques en donde cada uno es un subsistema y en donde las relaciones se indican por líneas que van de un bloque a otro)¹³¹.

Para evitar que la descripción del sistema sea muy compleja, es mejor empezar con una representación sencilla y luego, si fuera necesario, completarla con detalles. Esta descripción debe ser suficientemente flexible de tal manera que pueda cambiarse fácilmente a medida que nuevos conocimientos vayan apareciendo durante el desarrollo del proyecto.

- 4) *Definición del sistema ampliado (ambiente de sistema).* Para definir los objetivos del sistema, es necesario indicar claramente el papel que juega el sistema en el sistema ampliado del cual forma parte. Es necesario elaborar un diagrama de flujo con el fin de indicar estos elementos. Invariablemente ocurre que las relaciones entre el sistema y el sistema ampliado no son claras para la mayoría al comienzo del proyecto. El diagrama de flujo del sistema ampliado nos permite aclarar estos aspectos.

- 5) *Definición de los objetivos del sistema ampliado.* Debido a que los sistemas son jerarquizados, son los objetivos del sistema ampliado los que son cruciales ya que ellos determinan las condiciones en las cuales el sistema debe funcionar. Si el ambiente cambia, también cambiarán los objetivos del sistema.

Definir los objetivos del sistema ampliado es esencial ya que los objetivos del sistema podrán ser formulados de tal manera que contribuyan efectivamente a los objetivos de aquél, en lugar de estar apuntando en direcciones diferentes, lo cual permite garantizar la flexibilidad necesaria para que el sistema se adapte a los cambios del ambiente.

- 6) *Definición de los objetivos del sistema.* La parte culminante de cualquier definición de objetivos es la formulación del criterio, generalmente económico, que permita medir la eficiencia con la cual el sistema logrará su objetivo. La formulación del criterio económico puede requerir un estudio cuidadoso. Sin embargo, en los comienzos es mejor definir los objetivos en términos amplios.

131. Nótese que, de cierta manera, Jenkins considera que el todo está definido por las partes. En parte se comprende dado que la situación se considera como un sistema duro.

Aquí es importante hacer una lista de todos los objetivos posibles tratando de darles un orden de importancia. Por razones de manipulación del modelo, será necesario decidirse por uno solo, lo que obliga a hacer concesiones y compromisos.

- 7) *Definición del criterio económico general.* Una vez que los objetivos se han coordinado, el paso siguiente es definir, en los términos más precisos posibles, un criterio que permita medir la eficiencia con la cual el sistema puede lograr su objetivo. Generalmente se trata de un criterio económico, como ya se indicó.

Los criterios generales deben estar relacionados con los objetivos, ser simples y directos, aceptados aún en el caso de que sean cualitativos.

Respecto a cómo manipular objetivos que estén en conflicto, cuando el modelo es de programación lineal, es posible utilizar la programación de metas. Aquí se definen pesos a los diferentes objetivos y con ellos se plantea una sola función objetivo que busca minimizar las discrepancias entre ellos. Otra forma es decidirse por un objetivo que sea representativo de los criterios del sistema e incluir los objetivos restantes en forma de restricciones en el modelo.

- 8) *Recolección de información y datos.* La fase final y probablemente las más extensa en el análisis del sistema es la recolección de los datos y de la información que formarán las bases de cualquier modelado futuro del sistema. Si el sistema va a ser creado, entonces los datos se obtendrán de la investigación y desarrollo de sistemas similares en caso de que estos existan. Los datos y la información son necesarios no sólo para dar indicaciones de cómo opera el sistema, sino para predecir el ambiente en el cual el sistema lo hará en el futuro.

10.2.3 Diseño del sistema (síntesis)

Esta fase incluye los pasos siguientes.

- *Predicción.* La predicción es el primer paso importante en el diseño de cualquier sistema. Predicciones exactas son esenciales para el diseño eficiente de un sistema. Por el contrario, si éstas son inexactas, no podrán ser compensadas por la sofisticación y la optimización del modelo que puedan hacerse posteriormente. Las predicciones por sí solas no son de valor si no

se tiene una idea de la exactitud, de tal manera que se pueda asociar una función de riesgo en el diseño del sistema.

- *Construcción del modelo y simulación.* Para calcular los costos asociados con las diferentes formas en que puede funcionar el sistema, es necesario predecir el comportamiento del sistema con respecto a un amplio rango de condiciones de operación, lo cual puede lograrse a través de la construcción de un modelo. Éste debe ser elaborado teniendo en mente su posterior optimización. La Investigación de Operaciones presta aquí, un invaluable apoyo.
- *Optimización.* Este paso está ligado al anterior. Los mismos criterios ofrecidos por la I. de O. tienen cabida aquí. Es interesante que a menudo la optimización pueda resultar en un proceso de suboptimización por lo que se debe estar atento a este hecho. Por ello es importante definir claramente los objetivos del sistema ampliado porque de otra manera el “óptimo” del sistema podrá estar en conflicto con el ambiente en el cual operará el sistema¹³².
- *Control.* El control es necesario debido a que las perturbaciones impredecibles que afectan a un sistema, desvían el comportamiento actual de su comportamiento predicho. Debe ser considerado como parte integral del sistema y no como una idea tardía, y debe ser general y no centrado en aspectos a menudo irrelevantes.

Confiabilidad. Un buen sistema de control debe incluirse, en parte para asegurar una buena confiabilidad. Sin embargo la confiabilidad de los sistemas incluye otros aspectos diferentes al control ya que debe tener en cuenta los efectos globales de la incertidumbre en el diseño del sistema. La teoría estadística brinda una valiosa herramienta al respecto. Por otra parte, la experiencia con equipos y sistemas semejantes es a veces imprescindible.

10.2.4 Realización

Ningún estudio de sistemas, no importa qué tan bien llevado a cabo haya sido, puede considerarse útil si no es ejecutado. Indicaremos los pasos más importantes.

¹³². No nos debemos confundir aquí con otro concepto de suboptimización el cual dice que en general, siempre se suboptimiza ya que “lo mejor” es una meta inalcanzable y además el hecho de aceptar compromisos entre los diferentes objetivos nos impide lograr “lo mejor”.

- *Aprobación de documentos y sanción.* Los informes finales del proyecto deben ser redactados para llevar a cabo acciones concretas. Las fallas en la comunicación en esta importantísima fase pueden arruinar lo que de otra manera hubiera sido un buen estudio de sistemas. Para ello es recomendable discutir el contenido y la forma con los administradores y supervisores quienes serán responsables de llevar a cabo el proyecto. Los manuales de presentación de informes son obras de consulta obligada si se quiere tener éxito, y éxito significa, aquí, que el trabajo se lleve a cabo.

Esta es la fase más crítica de cualquier estudio de sistemas puesto que en este momento es cuando se debe tomar la decisión de continuar y construir el sistema. Obviamente, la decisión será favorable si la propuesta es clara y objetiva; adornarla más de la cuenta o pecar de exceso de humildad haciendo resaltar más los perjuicios que los beneficios son dos procedimientos seguros para que jamás la propuesta sea escuchada. La honestidad debe primar por encima de todo.

- *Construcción.* A veces es necesario construir equipos y diseñar soporte (“hardware” y “software” del sistema). Debido a que en esta fase la mayor parte del equipo de trabajo ya se ha disuelto, es fundamental considerar la construcción como parte integrante del diseño del sistema. Cada paso del diseño, construcción e instalación de los equipos debe ser vigilado para evitar demoras que afecten los costos y la eficiencia del sistema diseñado.

10.2.5 Operación

Una vez que el sistema ha sido diseñado, construido e instalado en el ambiente de trabajo, será necesario tener en cuenta los siguientes pasos.

- *Operación inicial del sistema.* Una ligazón efectiva entre el equipo de sistemas y los usuarios es esencial para obtener los beneficios plenos del estudio realizado. En general, esta parte es mal ejecutada en la práctica. Para evitarlo es conveniente que de antemano se posea documentación y entrenamiento adecuado. También es importante incluir, en el grupo de sistemas, como ya se indicó, a uno de los miembros encargados de la operación.
- *Evaluación retrospectiva del proyecto.* Cuando el sistema ha sido operado por un tiempo suficientemente largo, el grupo de sistemas debe colaborar con los usuarios a fin de hacer una evaluación retrospectiva del funcio-

namiento del mismo. Si todo marcha bien, nada habrá que objetar. De lo contrario, será necesario tomar medidas que corrijan la situación anómala. Nada puede ser más dañino para el enfoque de sistemas que considerar terminado un trabajo cuando el sistema original ha sido completado.

Esta fase brinda una oportunidad magnífica para comprobar si las suposiciones económicas fueron acertadas, con lo que se puede mejorar el pensamiento de sistemas para futuros desarrollos.

Es fácil observar cómo los requisitos impuestos a cualquier metodología sistémica se cumplen a cabalidad en esta metodología: definición del sistema, de los subsistemas y del ambiente; definición de los objetivos del sistema y medidas de actuación del sistema y de los subsistemas. Existencia de un subsistema administrativo que coordine y controle las actividades respectivas.

10.3 La Dinámica de Sistemas de J.W. Forrester

Se ha escogido esta metodología ya que de alguna manera representa una corriente sistémica que se sitúa entre las metodologías más “duras” como la de Jenkins y las más blandas, como la de Checkland. En este punto es bueno recordar la advertencia de Ackoff cuando se refiere al uso de modelos de sistemas deterministas utilizados para describir modelos de sistemas animados o sociales¹³³.

El año 1946 se puede considerar como el inicio formal de la cibernética. Aunque de corte reduccionista y mecanicista, esta rama del conocimiento ha ampliado su enfoque teniendo en cuenta algunos de los planteamientos elaborados por la teoría de sistemas gracias a su relación con la teoría de control.

El concepto básico de la cibernética es el “lazo de retroalimentación”: representa la influencia que puede ejercer un elemento de un sistema sobre sí mismo, pero a través de su influencia en otros elementos¹³⁴. Esta teoría postula que los sistemas pueden describirse en términos de elementos que interactúan mediante acoples de partes en los cuales se hacen presentes estos lazos de retroalimen-

133. *Cfr.* Cap. 5, numeral 5.1.2.2.

134. Es importante tener en cuenta la discusión que se llevó a cabo en el numeral 4.3.

tación. La interacción se ilustra en un lenguaje esquemático conocido como *diagramas causales*. En ellos se establecen relaciones de tipo causal entre los diferentes elementos del sistema tal y como lo propone O. Lange. En la figura 10.4 se destacan algunos lazos de retroalimentación.

10.3.1 Causalidad

De una manera intuitiva podemos comprender la causalidad como el origen o explicación de un hecho. Es el caso común en la física clásica (recordar lo discutido en los numerales 1.1.3 y 1.2).

Supongamos que un gas está confinado en un recipiente rígido. El gas ejerce una presión P sobre las paredes del recipiente, debido a su confinamiento. Si calentamos el gas, *sin permitir que aumente su volumen*, la presión sobre las paredes del recipiente aumentará debido a que la energía de las moléculas del gas aumenta: la temperatura afecta a la presión. Podríamos indicar gráficamente lo anterior mediante el diagrama causal ilustrado en la figura 10.5.

Relación causal entre temperatura y presión

Fig. 10.5

El arco dirigido (o flecha) muestra el sentido de la causalidad. Esta observación se escribe matemáticamente:

$$P \propto T \quad (10-4)$$

en donde P es la presión del gas que se encuentra a una temperatura T . El símbolo $\propto$ significa “directamente proporcional a”: a mayor (menor) T , mayor (menor) P . ¿Pero el aumento de la presión, aumentará la temperatura del gas?

Consideremos otro ejemplo. Comer en exceso causa, en general, aumento de peso. En este caso es posible dar una explicación a partir de una ley biológica, aunque en ocasiones hay personas que aparentemente comen mucho y sin

embargo parecen no engordar. Concluimos que el alimento afecta al peso (masa corporal). También utilizaremos una flecha que une a ambas situaciones:

Relación causal entre alimento y peso

Fig. 10.6

Se concluye que a más alimento, mayor aumento de peso o que a menos alimento, menor aumento de peso. Pero ¿el aumento de peso implica un aumento en el consumo de alimentos?

En forma más general, más que causalidades, hablamos de relaciones, de influencias.

La afirmación o negación de estas inversiones en la causalidad requiere un estudio cuidadoso y es la base de los lazos de retroalimentación.

Con el fin de facilitar el análisis de los diagramas causales la flecha puede indicar:

- Una causalidad directa, sin excepción, como en el caso de la presión y la temperatura en un gas.
- Una influencia o afectación, con posibles excepciones, como en el caso de los alimentos, resultado estadístico de situaciones observadas en el mundo real.
- Una conjetura a probar.

La “causalidad” (o relación) podrá, pues, basarse en leyes naturales, en experiencias empíricas, en datos estadísticos o incluso en conjeturas. Es necesario tener en cuenta estos factores cuando se realizan modelos causales.

Es muy útil, cuando se analiza la influencia de una situación sobre otra, efectuar un experimento mental (o real si es posible y necesario) en el cual nos preguntamos lo que ocurriría si esta influencia fuera la única que actuara sobre el elemento afectado. Así, en el caso de los alimentos no debemos incluir, en la relación causal, situaciones como alimentos dietéticos o personas hiperactivas que consumen más energía que el promedio, si el análisis se está haciendo bajo condiciones normales.

Cuando se establecen diagramas causales es fundamental preguntarse:

- ¿Qué tipo de causalidad está implicada?
- ¿Las hipótesis son plausibles?
- ¿Qué evidencia puede presentarse para aceptar o refutar la relación?
- ¿Qué hipótesis alternativa es posible?

10.3.2 Lazo de retroalimentación

Como se indicó anteriormente, un elemento puede afectarse a sí mismo a través de una serie de relaciones causales. La figura 10.7 (adaptada de Aracil, 1978 p. 71) muestra un modelo que describe la forma como una población de ballenas se afecta así misma mediante la migración y a su vez es afectada por la pesca.

Dinámica de una población de ballenas

Fig. 10.7

Los signos que aparecen en el diagrama tienen el siguiente significado. Si el nacimiento de ballenas crece, la población de ballenas se verá aumentada (si decrece, disminuirá); decimos en este caso que la causalidad es positiva; de allí el signo “+”. Igual ocurre con la relación “población de ballenas” y “migración de ballenas” y con “migración de ballenas”, y “nacimiento de ballenas” (a más

migración, más nacimientos; a menos migración, menos nacimientos)¹³⁵. El lazo de retroalimentación formado por este ciclo es positivo, ya que los signos son todos positivos.

También se dice que un lazo es positivo si el número de causalidades negativas es par (el producto de un número par de signos negativos, da positivo). Por otra parte, si la “población de ballenas” aumenta, aumentará las “muerte de ballenas” (signo positivo); si se aumenta la “muerte de ballenas” la “población de ballenas” disminuirá. El lazo es, pues negativo. El lector podrá deducir fácilmente el caso de “población de ballenas” y “pesca de ballenas”, así como el “control de pesca” y su influencia sobre la misma.

La importancia de los lazos de retroalimentación estriba en el hecho de que ellos dominan la dinámica del sistema. Así como los lazos de retroalimentación positiva incrementan el comportamiento de la parte que afectan, los de retroalimentación negativa lo controlan. En esencia, el control de un sistema es efectuado por los lazos de retroalimentación negativa. Y la estabilidad del mismo es la combinación de los lazos positivos y negativos.

Al identificar estos lazos, los elementos externos al sistema, el ambiente, quedan claramente determinados y son incluidos en el mismo. Ésta es una característica muy importante de los sistemas dinámicos que vamos a analizar: el ambiente hace parte del constructo mental “sistema”. El sistema, originalmente abierto, es convertido ahora en un sistema cerrado gracias a la casi-descomposición¹³⁶.

Los diagramas causales o de relaciones son el nuevo lenguaje de los sistemas. Los sistemas retroalimentados, son la forma de expresar la complejidad. Estos sistemas son no lineales.

Con base en estos principios es posible desarrollar modelos de muy diversa índole. Desde modelos de fenómenos duros, como los utilizados en ingeniería hasta modelos más “blandos” como los del área ambiental, la economía y aún la psicología y la sociología.

135. Esta es una forma simplista de decirlo. En un análisis más riguroso es necesario referirnos a *tasas de nacimiento* y *tasas de muerte* en lugar de simplemente *nacimientos* y *muertes*.

136. Esto no contradice las nociones de ambiente y sistema que hemos discutido antes. Es simplemente una convención, ya que de todas formas los elementos del ambiente, que se denominan variables exógenas, afectan a las variables del sistema pero no son afectados por ellas.

La metodología de Forrester permite expresar cualquier sistema dinámico susceptible de ser cuantificado, mediante la combinación de *niveles* y *flujos* (con sus variables auxiliares).

10.3.3 Niveles

Un nivel es la representación de una condición o estado de un elemento de un sistema. Los niveles representan “acumulaciones” de los atributos (propiedades) mediante las cuales los elementos son descritos. El mejor símil o metáfora para comprender este concepto (y el de flujo) es considerar un tanque que se está llenando con agua mediante una o varias entradas, y se vacía mediante una o varias salidas. La figura 10.8 es un ejemplo al respecto.

Tanque que se llena y vacía mediante llaves de entrada y salida

Fig. 10.8

La cantidad de agua acumulada es el nivel. Su representación gráfica en los *cursogramas* o *diagramas de Forrester* es un rectángulo, como el indicado en la figura 10.9.

Representación gráfica de un nivel

Fig. 10.9

10.3.4 Flujos

Los flujos (acciones) causan que el nivel que afecta, cambie. El símbolo tradicional es una válvula electrónica ligeramente modificada para poder incluir en ella información nemotécnica. En la figura 10.7 los flujos son la cantidad de agua que entra y sale del tanque en un instante de tiempo determinado. Lo que fluye es agua, representada por la línea continua que indica la dirección del flujo. En los flujos no hay acumulación de materia. Su representación gráfica es la de la figura 10.10. Es la parte del proceso que modifica a un nivel¹³⁷; generalmente representa una decisión o una acción que afecta su valor.

Generalmente los flujos tienen asociado dos tipos de elementos: los parámetros –por ejemplo *TA* en la figura 10.10, que representa el tiempo promedio en que el nivel se llenaría, o su inverso que es el porcentaje que fluye por unidad de tiempo– y las variables auxiliares.

Representación de un flujo

Fig. 10.10

Algunas de estas variables se conocen como “tasa de cambio” (por ejemplo, los porcentajes de nacimiento o muerte). Las “nubes” son fuentes y destinos de los flujos cuando estos no vienen de, o no van a, otros niveles. Son parte del ambiente. Cuando se combinan flujos y niveles, en general debe existir un *canal de información* entre el nivel y el flujo como lo indicaremos más adelante.

137. En la nomenclatura original de Forrester se habla de “tasas” (rates). Esto induce a menudo a confusiones entre el concepto de lo que fluye y la medida de la cantidad que fluye por unidad de tiempo. Por esta razón introducimos más bien el término flujo.

10.3.4.1 Variables auxiliares. Parámetros

Para aclarar el significado de una ecuación de flujo es necesario, frecuentemente, dividirla. Estas ecuaciones reciben el nombre de “ecuaciones auxiliares”. Lo anterior no contradice la afirmación de que la estructura de un sistema está compuesta sólo de niveles y flujos. Las ecuaciones auxiliares son subdivisiones algebraicas de las ecuaciones de flujo. Cada ecuación parcial tiene significado en sí misma. Se encuentran entre el canal de información de un nivel y los flujos que son afectados por él.

El símbolo para representarlas es un círculo con el nombre de la variable, y tiene entradas y salidas que conectan con otras variables auxiliares o con un nivel. Ver figura 10.11

Representación de una variable auxiliar

Fig. 10.11

Se pueden utilizar como variables ecuaciones matemáticas (función exponencial, logarítmica, sinusoidal etc.), funciones especiales (salto, impulso), tablas o cualquier otro tipo de cálculo que sea necesario para describir un flujo en particular.

También es necesario, para el cálculo de los flujos, utilizar constantes. En los diagramas de Forrester el símbolo para las constantes es el que aparece en la figura 10.12.

Representación de un parámetro

Fig. 10.12

10.3.5 Flujos, niveles y lazos de retroalimentación

Los lazos de retroalimentación descritos anteriormente se pueden representar convenientemente mediante la interrelación de niveles y flujos. El principio básico es que un nivel sólo puede ser afectado por uno o varios flujos. *No es posible que dos niveles se afecten (o interactúen) entre sí en forma directa.* En otras palabras, únicamente los flujos afectan a los niveles; jamás dos niveles pueden hacerlo en forma directa. Por otra parte, los flujos no pueden afectarse entre sí; solamente son afectados por el nivel (o niveles) con el que ellos conectan, directa o indirectamente (a través de otros niveles), y exclusivamente *a través de canales de información.* Estas condiciones garantizan la independencia de las políticas (representadas por flujos) y de sus efectos (representados por niveles) en un intervalo de tiempo relativamente pequeño. Desde un punto de vista matemático, lo anterior permite establecer un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, simultáneas que facilita enormemente los cálculos de la simulación. Es posible permitir cierta licencia en la interacción directa entre flujos cuando existe certeza de una información instantánea entre uno y otro, pero esto debe, en principio, evitarse.

Entre flujos y niveles puede circular materia, dinero, personas, energía. Entre niveles y flujos, sólo información.

Aunque en principio estos planteamientos son de una sencillez extrema, no siempre es fácil distinguir, en la descripción de un sistema, qué parte es un nivel y cuál un flujo, y la forma como interactúan. Una manera práctica de lograr esta diferenciación es “congelar” la dinámica del sistema durante un intervalo de tiempo. Lo que permanece al detenerse el tiempo, será un nivel, pues éste representa acumulaciones; lo que se desvanece será un flujo, ya que ellos no pueden medirse instantáneamente. Así, en el ejemplo de los tanques, si detenemos el tiempo, el agua deja de fluir, por lo que los grifos son flujos; en cambio, el nivel del agua queda en su estado actual, por lo que se representa como un nivel.

Consideremos un ejemplo sencillo de una población urbana sin tener en cuenta las inmigraciones ni las emigraciones. Lo que nos interesa es el número de individuos (la variable P). Un diagrama causal y el correspondiente diagrama de Forrester se muestran en la figura 10.13.

Combinación de lazos positivos y negativos

Fig. 10.13

Las nubes de los flujos que ingresan a un nivel representan parte del ambiente y es de donde viene lo que fluye hacia el nivel. Estas son las variables exógenas. Las que corresponden a la salida de un nivel, representan los sumideros donde queda depositado el flujo. Sabemos que a más nacimientos (que es un flujo) aumentará la población (un nivel) y a más población habrá más nacimientos; este lazo es de retroalimentación positiva¹³⁸. Por su parte a más población, habrá más muertes (que es un flujo) y a más muertes, menos población. El lazo será de retroalimentación negativa. Se pueden observar dos lazos de retroalimentación: uno positivo y otro negativo. La relación entre el flujo de nacimientos y el nivel de población, se muestra por una línea continua porque es un flujo de materia. En cambio, entre la población y los nacimientos la conexión es una línea punteada: se trata de un flujo de información. Caso similar ocurre entre la población y la muerte. El lazo positivo se explica mediante la relación nacimientos, población, nacimientos y es positivo porque aumenta el nivel. En cambio la relación población– muerte–población es negativa ya que esta disminuye al nivel. Los parámetros PN y PM representan los porcentajes de nacimiento y muerte respectivamente.

138. En realidad, la situación no es tan simple. A más nacimientos mayor población, pero a menos población lo que se reduce es la tasa de nacimientos: la población seguiría aumentando, aunque a una tasa menor. Recordemos que la tasa es $dP/dt > 0$.

10.3.6 Ecuaciones matemáticas

Una vez diseñado el cursograma, escribir las ecuaciones matemáticas correspondientes no es, en general, una tarea difícil.

La ecuación de nivel, para el caso de la figura 10.13 es¹³⁹:

$$\begin{aligned} \text{Poblac. en } (t+Dt) &= \text{Poblac. en } (t) + \\ &Dt \text{ (Flujo de nacim. - Flujo de muertes)} \end{aligned} \quad (10-5)$$

en donde t es un instante de tiempo dado y $t+Dt$ el tiempo, un intervalo Dt más tarde. El valor de este intervalo necesita un análisis cuidadoso, aunque en muchos casos es común un valor entre 0.25 y 0.1.

Las ecuaciones de los flujos de nacimiento y muerte son un poco más complejas. Sabemos que el flujo de nacimientos depende del nivel de la población. Por esta razón decimos que los nacimientos por mes son el producto del porcentaje de nacimientos mensuales por la población existente. Por lo tanto:

$$F. \text{ Nacimientos} = PN \times \text{Población}$$

De manera similar:

$$F. \text{ Muertes} = PM \times \text{Población}$$

PN es del 2% anual y PM del 0.9% anual. La población inicial es de 1000 individuos.

La dinámica del sistema queda explicada por la acción simultánea de estos dos lazos de retroalimentación. Si el porcentaje de nacimientos es mayor que el de muertes, la población crecerá; si es menor, disminuirá; si son iguales, permanecerá constante.

Existen diversos software para este tipo de modelado: Dynamo (desarrollado por Forrester y su grupo), Stella y Vensim, entre otros. Debido a la opción que da Vensim para disponer de un programa de libre uso para asuntos académicos, mostraremos, el modelo y sus resultados en este software, en la figura 10.14.

¹³⁹. Esta ecuación es una aproximación numérica de la ecuación (5.3), numeral 5.3.1 y como se indicó en el pie de página 76.

Modelo en Vensim

Fig. 10.14.

Es fácil identificar los símbolos para los niveles, flujos y variables auxiliares. Observe el comportamiento exponencial, acorde con lo estudiado por la ecuación (5.4).

Las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{"F. Muerte"} = PM * POBLACIÓN$$

$$\text{"F. Nacimiento"} = PN * POBLACIÓN$$

$$PM = 0.009$$

$$PN = 0.02$$

$$POBLACIÓN = \text{INTEG} (\text{"F. Nacimiento"} - \text{"F. Muerte"}, 1000)$$

La última ecuación, en Vensim, se representa por una integral. Es equivalente a:

$$\text{Poblac. en } (t+Dt) = \text{Poblac. en } (t) + Dt (FN - FM)$$

Este tipo de modelos permite modificar valores y considerar nuevas variables con el fin de observar los impactos en el sistema. Por ejemplo, ¿cómo sería el comportamiento del sistema si durante un período de 2 años, la tasa de muertes fuera del 2.1% anual? ¿Qué ocurriría si existiera una inmigración de mil individuos por año, durante cinco años?

Como un ejemplo adicional, consideremos el caso de la contratación de profesores propuesto en el numeral 4.2.

Durante los últimos diez años, los profesores titulares vienen jubilándose a una tasa de 10 profesores por año. La universidad contrata inmediatamente 10 profesores novatos que inician su carrera docente y tardan 5 años en llegar a la categoría de titular. La planta de profesores titulares es de 50 docentes. No existen efectos aleatorios ni en la jubilación ni en la contratación. Repentinamente, en el año 11 se jubilan 15 profesores. Inmediatamente la universidad contrata 15 profesores nuevos para reemplazarlos y esta situación continúa igual, sin cambio, durante los años siguientes. Simule Ud. este sistema utilizando la Dinámica de Sistemas.

El modelo es el indicado en la figura 10.15.

Contratación de profesores

Fig. 10.15

Las ecuaciones son:

"F. 0 a 1"="PROF. 0"/"T. esc. 1" Units: prof/año
"F. 1 a 2"="PROF. 1"/"T. esc. 2" Units: prof/año
"F. 2 a 3"="PROF. 2"/"T. esc. 3" Units: prof/año
"F. 3 a 4"="PROF. 3"/"T. esc. 4" Units: prof/año
"F. 4 a 5"="PROF. 4"/"T. esc. titular" Units: prof/año
"F. contratac."="F. jubilación" Units: **pof/año**
"F. jubilación"=5+STEP(5, 10) Units: prof/año
FINAL TIME = 30 Units: año
INITIAL TIME = 0 Units: año
"PROF. 0"= INTEG ("F. contratac."-"F. 0 a 1",5) Units: prof
"PROF. 1"= INTEG ("F. 0 a 1"-"F. 1 a 2", 5) Units: prof
"PROF. 2"= INTEG ("F. 1 a 2"-"F. 2 a 3", 5) Units: prof
"PROF. 3"= INTEG ("F. 2 a 3"-"F. 3 a 4", 5) Units: prof
"PROF. 4"= INTEG ("F. 3 a 4"-"f. 4 a 5",5) Units: prof
"PROF. TITULAR"= INTEG ("F. 4 a 5"-"F. jubilación",50)
Units: prof
"T. esc. 1"=1 Units: año
"T. esc. 2"=1 Units: año
"T. esc. 3"=1 Units: año
"T. esc. 4"=1 Units: año
"T. esc. titular"=1 Units: año
TIME STEP = 1 Units: año

La dinámica del sistema se muestra en la figura 10.16.

Variación de los profesores titulares

Fig. 10.16

Observe cómo a partir de los 10 años el total de profesores titulares desciende continuamente hasta estabilizarse en 25, un resultado verdaderamente inesperado.

Nótese que en esta metodología la definición del sistema, de los subsistemas y del ambiente es precisa: los da el diagrama causal y el cursograma. Las medidas de actuación son de comportamiento más que de objetivos. Son los valores que toman los niveles durante el período estudiado: tendencias a equilibrio, estabilidad, inestabilidad o desorden.

10.4 Resumen

La programación lineal busca encontrar el valor óptimo (máximo o mínimo según el caso) de un único objetivo definido para el sistema y que debe expresarse en forma de un polinomio algebraico lineal. Esta búsqueda está restringida a los valores que las variables puedan tomar y que deben ser expresadas en ecuaciones lineales, restricción que se expresa por medio de desigualdades de tipo menor e igual, iguales, o mayor e igual a ciertos valores dados, los valores disponibles de los recursos que el sistema utiliza. La solución se obtiene mediante lo que se conoce como método Simplex.

La metodología de G. M. Jenkins, por primera vez, considera la empresa como un sistema abierto. Aunque muy relacionada con la visión clásica de la ciencia, especialmente con lo que se conoce como "Análisis de Sistemas", Jenkins intenta interactuar los subsistemas que componen a una organización, con su ambiente. Es una metodología dirigida fundamentalmente al desarrollo de nuevos equipos o modelos de producción para los sistemas hombre-máquina.

La metodología de J. W. Forrester busca modelar y analizar la dinámica de los sistemas que de alguna forma permite que sus variables fundamentales sean, al menos, cuantificables. Esta metodología se basa en la idea de que todo sistema puede relacionarse con tanques —que se denominan niveles—, que se llenan y vacían a través de llaves o grifos —que se reconocen como flujos—, que pueden cerrar o abrir su paso. De esta manera, Forrester traslada un sistema de ecuaciones diferenciales a gráficas, lo que facilita su aplicación práctica. Basada en la cibernética, los lazos de retroalimentación, tanto positivos (aquellos que permiten que los elementos se refuercen en su aumento o disminución) como negativos (aquellos que controlan el proceso) explican la dinámica del sistema a través del tiempo. Como toda buena herramienta de simulación, la de Forrester permite variar parámetros fundamentales para observar su efecto sobre el sistema.

CAPÍTULO 11

METODOLOGÍAS BLANDAS. LA METODOLOGÍA DE P. B. CHECKLAND

11.0 Antecedentes de la metodología

Cuando el Dr. G. M. Jenkins dirigió el Departamento de Sistemas de la universidad de Lancaster, Inglaterra, creó una compañía de consultoría, ISCOL Ltd. Profesores, estudiantes y asesores externos se unieron para ayudar a las empresas de producción a resolver sus problemas. Brian Wilson, Ingeniero de control, y Peter B. Checkland, Ingeniero químico, entre otros, formaron parte del grupo de docentes. Checkland se interesó por los problemas no tanto de carácter técnico que estaban siendo resueltos exitosamente mediante la Ingeniería de Sistemas¹⁴⁰ y la metodología de las “4 Ms” citada en el capítulo 10, sino en situaciones de carácter administrativo. Las técnicas y metodologías disponibles en ese momento no eran aplicables a este tipo de situaciones, por lo que Checkland desarrolló otra manera de enfrentar situaciones complejas del mundo real: la metodología de sistemas blandos (MSB) –o SSM (Soft Systems Methodology) en inglés–.

11.1. El "qué" y el "cómo"

El lector podrá darse cuenta cómo las ideas de Churchman son aquí, de forma muy literal, tenidas en cuenta¹⁴¹.

Checkland observó que la dificultad principal por la cual las técnicas de la Ingeniería de Sistemas, e incluso la metodología de Jenkins fracasaban al enfrentar situaciones problemáticas de lo que distinguió como “sistemas de

140. No se trata de sistemas de computación sino una serie de métodos, metodologías y técnicas de la ingeniería tales como la Investigación de Operaciones, el Análisis de Sistemas (Rand Corporation) y la teoría de control entre otras, que permitían enfrentar sistemas complejos.

141. *Cfr.* 9.4.

la actividad humana”¹⁴², descansaba en el hecho de que, siendo todas ellas permeadas por una visión desde la perspectiva de la ingeniería, el *qué hacer* estaba definido y, por lo tanto, lo que el ingeniero tenía que decidir era *cómo hacerlo*. Esto quedaba muy claro en los modelos de optimización cuando se planteaba una función objetivo (Cfr. numeral 7.1) que representaba el *qué*; el modelo matemático conducía a un *cómo* hacerlo mejor. Las metodologías de los sistemas duros buscan optimizar. Cuando hay acuerdo en un único objetivo, sólo un sistema es relevante.

11.1.1 Generalidades

La MSB es una metodología de *aprendizaje*. Durante este proceso se busca cómo interrelacionar los diferentes puntos de vista para lograr mejoras. No es, pues, una metodología de sistemas que buscan metas (H. Simon) sino que “mantienen relaciones” (Vickers). Intentar definir un futuro ideal y conseguir consenso sobre él presenta muchas dificultades; Las metodologías que hacen esto son de diseño y este no es el caso de la propuesta de Checkland.

Cuando se trata de enfrentar situaciones conflictivas en los sistemas blandos, se presenta la dificultad de escoger *el problema*. Para comprender bien esta dificultad, hay que tener en cuenta que, desde el punto de vista de esta metodología, una organización surge del discurso entre dos o más individuos con visiones y puntos de vista diferentes respecto a la organización misma y a lo que se considera de trascendencia (Checkland, 1998). De esto puede resultar un grado de acuerdo en los propósitos, o un proceso social para buscarlos, o criterios para evaluar los éxitos en relación con la búsqueda de tales propósitos, pero también tensiones y conflictos. Por lo tanto, un modelo de organización debe “capturar la tensión entre la buena disposición de los individuos para organizar su búsqueda racional de metas y la absoluta terquedad e irracionalidad que a veces se demuestra”. Por esta razón, no es fácil encontrar ese objetivo

142. Un “sistema de la actividad humana” es un sistema social (un grupo de personas que actúan en un espacio dado) que se han reunido para lograr algún propósito (o propósitos) comunes. En la Teoría de la Complejidad, esto sería un “sistema social”. Vale la pena, sin embargo hacer la diferencia. Los propósitos de los sistemas de la actividad humana son fácilmente identificables, y todos sus integrantes trabajan para conseguirlos. Esto no es así en los sistemas sociales. Sin duda que un sistema de la actividad humana es un sistema social, pero no necesariamente un sistema social, es un sistema de la actividad humana.

único, ese problema trascendental que resume toda la situación a resolver en una organización. Por el contrario, “habrá docenas de candidatos a ocupar tan importante sitio”.

La visión anterior destaca la importancia de conocer la posición de los individuos dentro de la entidad (su rol o roles), así como los valores y las normas que la rigen. Estos tres elementos están en *continuo cambio y negociación* debido a la dinámica que se genera a través de las conversaciones y discusiones. La organización debe aprender a *acomodarse* a estos cambios temporales entre los individuos y subgrupos que puedan proporcionar bases para la acción, esta última entendida como un *manejo del cambio y no como la toma de decisiones racionales* para lograr objetivos. La metodología que vamos a describir ayuda a gestionar las relaciones orquestando un proceso a través del cual aquellos que tengan que ver con las organizaciones puedan hallar y conocer los acuerdos que sean factibles y deseables.

11.1.2 Fundamentos

La metodología parte de dos hipótesis de base¹⁴³:

- El mundo está compuesto (o puede suponerse compuesto) por sistemas.
- Tales sistemas pueden caracterizarse nombrando (definiendo) sus objetivos.

En la ingeniería clásica estas definiciones explícitamente deberían contener una acción (o varias), las características principales de la situación, ciertos recursos y ciertas restricciones. Bajo estas condiciones era posible, en principio, definir un proceso administrativo que lograra un único objetivo propuesto, para cada “problema” encontrado.

Al enfrentar los problemas que presenta la complejidad de los procesos administrativos, se observó que este tipo de enfoque era muy limitado. De hecho es común encontrar objetivos que se oponen: típico es el producto que todos deseamos: bueno, bonito y barato. Esto llevó a la propuesta de una metodología en la cual se distinguiera entre el pensamiento de sistemas duros y el de sistemas blandos.

143. Este resumen se basa fundamentalmente en: P. B. Checkland and P. Scholes (1990) y en P. B. Checkland (2000).

La metodología de Sistemas blandos se fundamenta en un proceso cognoscitivo en donde la experiencia juega un papel fundamental. En general, el ser humano inicia su conocimiento a partir de la experiencia y de la manera como sus facultades estructuran estas vivencias dándoles un significado, decantándolo mediante conocimientos previos ya sean empíricos o científicos. Este conocimiento hace que se generen intenciones y no simplemente reacciones genéticas ante lo percibido y conocido. No sólo experimentamos el mundo, lo interpretamos.

El concepto de *propósito* es la característica que va a ser tomada en cuenta como soporte primordial para comprender la complejidad de una organización. En la Ciencia Social aún no es posible basar los propósitos de las acciones humanas en razones puramente científicas. Nuestras acciones con propósito se basan en gran medida en la experiencia (conocimiento) inmediata.

La figura 11.1 establece un ciclo sistémico de aprendizaje mediante la interacción entre la experiencia del mundo real y el conocimiento basado en la experiencia. Ella será la base de la metodología que vamos a analizar.

Ciclo sistémico de aprendizaje

Fig. 11.1

Es importante aclarar que las preguntas ¿cuál es el sistema, cuáles son sus objetivos? no tienen respuesta cuando se trata de comprender los sistemas de la actividad humana. Lo que hace que este tipo de sistemas sea difícil de entender es precisamente la dificultad de identificar una estructura y unas intenciones. Por esta razón no tiene sentido hablar de “el problema”. En realidad lo que existe son *situaciones problemáticas*, *sensaciones de inconformidad* que son la expresión de los diferentes propósitos presentes en la organización. Ante todo

se tuvo en cuenta que, por encima de la reparación o mejora de situaciones específicas, lo fundamental era considerar situaciones de personas cuyos propósitos tuvieran significado propio. Esto es lo que se resalta, en la visión moderna de la administración, cuando se define el concepto de organización. La metodología busca *aprender* sobre la situación a considerar. Por ello busca modelar, en un constructo mental, un conjunto de actividades relacionadas cuya propiedad emergente sea un propósito identificado. Pero debido a la diversidad de propósitos existirán muchos modelos posibles. Se buscará entonces aquellos que se consideren los más relevantes para la situación a analizar. Toda actividad con propósito está a su vez íntimamente relacionada con una cosmovisión, por lo que ésta debe ser tenida en cuenta.

Se ha pasado, entonces, de una concepción basada en la existencia de “un problema” que obviamente requiere solución, a una situación en la cual varias personas la consideran como problemática¹⁴⁴. Como dicha situación problemática es vista desde diferentes percepciones, es decir cosmovisiones, entonces existirán varios modelos pertinentes, que se fundamentan en propósitos más que en descripciones del mundo real. Ellos serán utilizarlos como base para hacernos preguntas acerca del mundo real. La metodología se convierte, pues, en un proceso de aprendizaje continuo sobre la situación que nos interesa, que se modifica debido a las nuevas percepciones y conocimientos que se van adquiriendo a medida que vamos conociendo más sobre ella. Este proceso se debe detener cuando se hayan logrado acuerdos sobre acciones factibles que mejoren la situación, respetando la historia, relaciones, cultura y aspiraciones de sus integrantes.

Es común definir al pensamiento duro de sistemas como aquel que se aplica a los sistemas técnicos bien definidos (es decir pensamiento de (en) sistemas duros), y el blando a los sistemas deficientemente definidos, poco precisos, que incluyen a seres humanos y aspectos culturales. Esto no es incorrecto, pero no es el concepto real de lo que se denomina *sistemicidad*. Un pensamiento duro de sistemas ve (espía) el mundo que percibe como formado por sistemas: el mundo es sistémico. Un pensamiento blando de sistemas observa (espía) la complejidad y la confusión del mundo: es un mundo confuso, pero lo organiza

144. Warfield (2006, p. 349-) hace notar de la importancia de no hablar de “problema” o “sistema complejo” puesto que esto condiciona, lingüísticamente, a pensar en que existe un problema, o un sistema que deben ser resueltos y por lo tanto crea, psicológicamente, una gran barrera para poder adentrarse en la situación. Una “situación problemática” es algo mucho más general; también es mejor hablar de “opciones” o “alternativas”.

a través de sistemas de aprendizaje sobre ese mundo: lo ve como un sistema de aprendizaje. Lo sistémico, aquí, es este proceso de aprendizaje.

Estamos acostumbrados a utilizar estructuras intelectuales predefinidas, que consideramos adecuadas, para interpretar, para darle sentido a nuestras experiencias y nos oponemos a modificarlas aun cuando la realidad no se ajusta a ellas. Aprender por la experiencia es un proceso difícil. Recordemos lo de "orientado por la técnica" y "orientado por el problema" (numeral 9.0).

Para identificar un sistema con propósito es necesario que exista un punto de vista, una cosmovisión que lo soporte, lo que en principio permite asegurar que es único para cada observador particular. Sin embargo, las perspectivas que genera son múltiples. Checkland y Scholes ejemplifican, con la figura 11.2, cómo es posible pensar en diferentes sistemas relacionados con un mismo hecho: un grupo guerrillero, un periódico, una liga de fútbol profesional.

Diversas percepciones de un mismo sistema de la actividad humana. Tres ejemplos

Fig. 11.2

Ninguna de las percepciones indicadas en la figura 11.2 es, por sí sola, “verdadera”. Cada uno de ellas define un sistema percibido por alguien. El “sistema real” será simultáneamente el conjunto de visiones particulares, y posiblemente de otras que se ha escapado de ser incluidas en las listas indicadas.

En cuanto a una actividad con propósito, ésta se puede concebir como una flecha (figura 11.3).

Esquema general de un propósito

Fig. 11.3

Esta acción es una expresión de la intención de alguna(s) persona(s) interesada(s) en que se lleve a cabo: **B**. Como **T** es una acción humana, alguien debe ejecutarla; este ejecutor o ejecutores serán **A** en la figura. La acción ejercerá un impacto en alguien o algún grupo, que llamaremos **C**. Ella se desarrolla en un ambiente **E**. Por otra parte, puede existir una persona o un grupo que pueda detener la acción que se está llevando a cabo. Los hemos representado por **O**.

Supongamos que la actividad con propósito, **T**, es asistir a una fiesta con su pareja. **B** es tanto usted como su pareja. En principio, ambos son **C** pues son los beneficiados suponiendo que asistan porque lo desean y no por compromiso. En caso contrario serían los “perjudicados”; bajo la visión de la pareja, ellos seguirían siendo **C**, pero bajo la visión de quien los invitó, si se sintiera ofendida alguno de los dos, o ambos, pues cualquiera puede impedir que por la no asistencia, ella podría ser **C**. Si son independientes, **O** puede ser alguno de los dos, o ambos, pues cualquiera puede impedir que el otro vaya o decidir de común acuerdo, no ir. Si dependen de otra persona (por ejemplo sus padres)

seguramente ellos representarán el elemento **O** de esta acción con propósito. **E** representa por ejemplo, la escasez de dinero, o la dificultad de hallar transporte, o el deseo de asistir o no, es decir, las restricciones. Aquello que se opone a la transformación. También es útil tener en cuenta lo que la favorece, pero pesan más las dificultades (son las que hay que “negociar”).

11.1.3 El proceso metodológico

En 1976 se presentó por primera vez la metodología bajo un esquema conocido como el de las “siete fases”. Aunque fue revaluada posteriormente por una versión *más sistémica*, sigue siendo una base importante para describir y enseñar la metodología. Indicaremos sólo su presentación gráfica (figura 11.4) y haremos referencia a ella durante la descripción del esquema publicado en 1988 (figura 11.5).

Metodología de las siete fases

Figura 11.4

Esquema ampliado de la metodología de Checkland

Fig. 11.5

En lo que sigue haremos una descripción rápida de este último esquema. Luego detallaremos algunos aspectos.

Tenemos una situación real que es considerada como problemática por alguien. Existe la sensación de que puede ser manejada con el fin de mejorarla. Ella se encuentra dentro de cierto contexto e historia lo cual es necesario tener en cuenta, algo que no puede subestimarse. La idea es formarse *una imagen* de esa *situación problemática*. No debemos referirnos a esta situación como “un problema” debido a que no conocemos prácticamente nada al respecto. Existe un problema cuando tenemos claramente identificada una situación actual que representa una situación no deseada y la situación que desearíamos obtener, y hay varias formas de lograrlo; el problema es cuál de estas formas debemos escoger por ser la más conveniente.

La situación problemática es pues una *expresión de preocupación*, que puede ser una *sensación de inconformidad* o una *proyección a futuro*: es la búsqueda de una idea general, vaga, que permita una comprensión inicial de la situación. Se logra a partir de uno o varios síntomas que puedan ser observados y considerados como importantes¹⁴⁵. El contacto con la situación real permite aclararla poco a poco. Es importante tener en cuenta que, en estos comienzos *debe evitarse el uso de conceptos de sistemas*, puesto que al no tener una situación definida –“un problema”– no hay traducción o interpretación posible en términos de sistemas. No debemos sesgar la situación por lo que es necesario *minimizar nuestra Weltanschauung* (W ¹⁴⁶), es decir, romper prevenciones, prejuicios y estereotipos. Algunas personas creen que esto no es posible debido a que siempre estudiamos y resolvemos las situaciones mediante una “ W ” particular. Tal vez se hace necesaria una diferenciación. Podemos decir que poseemos dos tipos de W s: una personal (digamos W_1) debido a nuestra educación y formación primera, y otra, W_2 debido a nuestra formación profesional. Es esta segunda W la que es necesario minimizar. Queremos, pues, evitar los prejuicios profesionales que puedan deformar la situación que está siendo observada. Esto sería el equivalente a la fase 1 y 2 de la figura 11.4.

Frente a esta situación existen unos *posibles solucionadores*¹⁴⁷ que van a utilizar la metodología. Son colaboradores, pero no los únicos que pueden enfrentar la situación.

En ausencia de acuerdos entre metas y objetivos, es necesario definir una jerarquía de sistemas. Es de mucha ayuda elaborar un “dibujo enriquecido”, que describa las primeras impresiones sobre el sistema a considerar, su ambiente y las relaciones que se perciben entre las diferentes componentes del mismo. Un dibujo permite visualizar, globalmente, una situación compleja, destacando las interrelaciones entre sus elementos. Esto no es posible si la situación se expresa mediante la prosa lineal común. Aunque esto requiere algunas nociones sobre sistemas, éstas deben ser las mínimas necesarias. No es sólo una comprensión de la situación a estudiar sino que se debe tener en cuenta el ambiente que la rodea y las proyecciones que el sistema esquematizado tenga

145. La metáfora del médico es aquí muy valiosa. Nosotros le contamos al médico los “síntomas” que nos aquejan. De allí él debe deducir la enfermedad.

146. Cosmovisión, visión de mundo. Palabra alemana: Welt=mundo, anschauung=contemplar.

147. Neologismo del autor.

con dicho ambiente. A esto haremos referencia más adelante. La figura 11.11 es una ilustración de esta idea.

A partir de su interacción con la situación problemática se abren dos corrientes, las cuales representamos por separado para facilitar la explicación pero que operan simultáneamente. Ambas deben conducir a acciones que produzcan los cambios necesarios para mejorar la situación, y deben tener su origen en las percepciones de las diferentes acciones con propósito en la situación (las tareas) y los asuntos en los cuales hay desacuerdos (conflictos).

En la parte derecha de la figura 11.5 se describe la corriente basada en la lógica. Allí se presentan sistemas con propósito en forma de modelos de la actividad humana (las fases 3 y 4), que se van a comparar con la situación real (la fase 5). Esta comparación da origen a un debate para proponer cambios (fase 6).

En el debate los cambios propuestos deben buscar ciertos *acuerdos* entre los diferentes intereses. El concepto de “consenso” no es aquí una buena opción. Los intereses y conflictos humanos difícilmente se deponen para lograr un acuerdo común. Lo que realmente ocurre es una especie de negociación en la que estos conflictos se “acomodan”.

La corriente lógica conduce a un cuestionamiento del mundo real. Sin embargo, ella sola no es suficiente para que los cambios sean los más adecuados. Los aspectos culturales juegan un papel de igual importancia; corresponde a la parte izquierda de la figura 11.5.

En la corriente cultural se tienen en cuenta tres aspectos para estudiar la situación problemática. El primero es la *intervención* misma, que no es otra cosa que la alteración que sufre la situación cuando agentes extraños se hacen presentes en ella¹⁴⁸. Es el “análisis uno” que es un importante complemento al dibujo enriquecido pues permite destacar los posibles “dueños” de la situación, dueños que son indicados por los “solucionadores” agregando nuevos sistemas relevantes. El segundo aspecto es considerar la situación como un *sistema social*, no sólo como un generador de *tareas* o *asuntos*¹⁴⁹. Las manifestaciones de los roles/normas/valores son expresadas de forma sencilla, pero esto permite mantenerlas constantemente en la mente para poder así desarrollar propuestas acordes con los intereses y esperanzas, seguramente cambiantes, de los afectados por la situación. Es el llamado “Análisis dos”. El “Análisis

148. En el cap. 9 se indicaron las intervenciones para cada uno de los tipos de metodologías allí indicadas.

149. Asuntos (issues): competencias, acuerdos, conflictos, convenios...

tres” da un paso más allá de la idea de describir un proceso social: considera los resultados de dicho proceso, que se manifiestan a través del poder. Es el examen del *sistema político*.

Estas dos corrientes, que deben considerarse simultáneamente, han de conducirnos a proponer cambios que sean acogidos por los afectados y que puedan llevarse a cabo, lo cual, seguramente, generará nuevas situaciones conflictivas. Como dice Senge: "Los problemas de hoy derivan de las 'soluciones' de ayer". El proceso no tiene fin, y la decisión de terminar en alguna parte es, en cierta medida, arbitraria.

Lo anterior deja claro que los aspectos subjetivos son seriamente tenidos en cuenta. Si este procedimiento es científico o no, queda abierto el debate. Lo que sí se puede asegurar es su rigurosidad intelectual. Ampliemos un poco más estos conceptos.

11.1.4 La corriente de la investigación basada en la lógica

Hemos dicho que en esta metodología se deben buscar los sistemas relevantes. Sin embargo, en principio, ningún sistema es intrínsecamente importante en los sistemas de la actividad humana. Debemos hacer ciertas escogencias, subjetivas sin duda, con la esperanza que nos ayuden a descubrir sistemas realmente representativos. Esta parte es muy difícil de aceptar para las personas entrenadas en las ciencias duras debido a la formación objetiva que las caracteriza.

11.1.4.1 Tareas primarias

Una ayuda para lograr esta elección es analizar las tareas primarias del sistema, proceso generalmente sencillo, pues se trata de identificar las acciones con propósito (sus tareas) que la entidad (o el sistema que contiene el problema) lleva a cabo para cumplir sus objetivos.

Por ejemplo, si consideramos la universidad como organización puede suponerse que sus tareas principales son impartir docencia, apoyar y desarrollar la investigación, prestar ayuda a la comunidad, mantener un presupuesto equili-

brado, etc. A partir de allí es posible nombrar algunos sistemas representativos basados en estas acciones: un sistema que gradúa profesionales, un sistema que produce descubrimientos, etc. Es importante hacer notar que hay dos formas de considerar este tipo de tareas. Por un lado, escoger una que se destaque como representativa de la situación problemática que se desea enfrentar. Si esto no es posible porque hay varias que deben ser tenidas en cuenta, entonces a tales actividades se las considera como subsistemas y con ellas se elabora el modelo conceptual.

Pero debido a que las tareas son diferentes y en cierta forma compiten generando conflictos o convenios, es posible proponer una segunda elección de sistemas representativos. Si el problema obedece a la asignación del presupuesto, podríamos pensar como sistema relevante “El que resuelve las dificultades en la repartición del presupuesto”. Otro sistema podría ser “un sistema que apoya cierto tipo de investigación”. Aquí no es de esperar versiones institucionalizadas de tales sistemas en el mundo real. Estos son los *sistemas relevantes basados en los asuntos y visiones* y no están reflejados explícitamente en la universidad estudiada (ni en ninguna institución).

Es útil pensar en un espectro que va desde los sistemas basados en tareas primarias, en un extremo, hasta los sistemas basados en conflictos y visiones, en el otro, pasando por actividades relevantes inmersas en conflictos que deban considerarse. La diferenciación entre ambos tipos de sistemas no es tajante; se trata más bien de manifestaciones diversas de aspectos institucionalizados (las tareas) y de aquellos que no lo son (los conflictos, las visiones).

Como no es fácil identificar estos sistemas, en particular los que surgen de los asuntos, el uso de metáforas es de gran ayuda. Pensar en relaciones entre *A* y un opuesto *B*. Por ejemplo, las relaciones entre policía/ladrón, parásito/huésped, esposo/esposa, amantes, amo/esclavo, amigos etc. “ayudan a mover el pensamiento”.

11.1.4.2. Definición raíz

Para construir un modelo de un concepto de una actividad compleja con propósito, se necesita una definición clara de la misma. La MSB logra esto a través de la “definición raíz”, que considera el propósito como un proceso de transformación *T*: una situación actual que es transformada en una situación

deseada, bajo una cosmovisión declarada. Los elementos de la transformación deben ser entidades (sustantivos, no verbos), resaltando que la misma entidad que entra debe ser la que sale transformada¹⁵⁰. Evidentemente, para una situación dada existen múltiples transformaciones debido a que existen múltiples percepciones de la misma situación, tal y como se ha ilustrado en la figura 11.3. La figura 11.6 muestra cómo una universidad puede ser conceptuada de diferentes maneras, de acuerdo con diferentes puntos de vista (W) ante la sensación: la universidad está perdiendo su rumbo. Sin estas diferentes cosmovisiones cualquier estudio de la universidad de nuestro ejemplo no puede ser sino parcial.

Diversas transformaciones de: “la universidad
está perdiendo su rumbo”

Fig. 11.6

Esta es una excelente manera de destacar las diferentes percepciones. Debemos insistir que tanto la entrada como la salida están referidas *a la misma entidad*.

¹⁵⁰. Copiando a la física en lo referente a la energía o a la materia, sería una especie de *principio de conservación de la entidad*.

Para el desarrollo del modelo mediante el cual vamos a concebir nuestro “sistema problemático”, no sirve una transformación del tipo: “profesores sin postgrado” → “nivel educativo mejorado” o algo por el estilo. La entidad *profesor* debe estar a ambos lados de la transformación. Por otra parte, la transformación no puede incluir acciones; no se deben incluir verbos sino entidades (sustantivos).

La sola transformación en sí indica un sistema relevante. Sin embargo posee poca información. Por lo tanto, debe desarrollarse en lo que se conoce como una *definición raíz*. La *definición raíz* es pues, una identificación verbal, cuidadosa de lo que *el* “problema” *es*. Para ayudar en este proceso se ha desarrollado la fórmula CATWOE. La figura 11.7 explica en qué consiste.

Estos mismos elementos los encontramos en la figura 11.3. Si una definición raíz los posee, debe ser preferiblemente en forma explícita; de otra manera, su exclusión debe darse de manera consciente. Bajo estas condiciones, podemos pensar que “técnicamente” está bien elaborada y es una opción aceptable para definir el todo con propósito que vamos a modelar. Sin embargo, esto no garantiza que sea una definición raíz “buena” o “correcta”. El veredicto final lo darán los resultados favorables o no que de ella se deriven.

C: Consumidores.	Las víctimas o beneficiarios de <i>T</i> .
A: Actores.	Aquellos quienes ejecutarán <i>T</i> .
T: Transformación.	Conversión de la entrada en salida.
W: Weltanschauung.	La cosmovisión que le da contexto a <i>T</i> .
O: Dueño (owner).	Quien(es) puede(n) detener <i>T</i> .
E: Restricciones ambientales.	Elementos externos al sistema que se aceptan como dados.

Elementos básicos de una definición raíz

Fig. 11.7

Sus elementos centrales son *T* y *W*. Cualquier actividad con propósito siempre tendrá diferentes transformaciones que la pueden expresar, derivadas de

diferentes *Ws* como se indicó en la figura 11.7 y por lo tanto tendrá diferentes definiciones raíz asociadas. Para aclarar, consideremos la transformación:

“Profesores sin postgrado” → “Profesores con postgrado”.

Una cosmovisión puede ser “la universidad desea mejorar su nivel académico”; otra: “la universidad desea aumentar, por razones de prestigio, el número de profesores con postgrado”; o: “la universidad quiere mostrarle a la comunidad y al estado que invierte una parte importante de su presupuesto en la capacitación de sus docentes”; incluso otra: “es la forma en que la universidad puede mejorar el ingreso salarial de sus profesores”. Y todas ellas caben en la sensación de inconformidad “La universidad está perdiendo su rumbo”. La lección es clara: una misma transformación puede tener diferentes cosmovisiones.

Pero además de los elementos del CATWOE se hace necesario indicar las interrelaciones de tales elementos. Un patrón sencillo para una definición raíz es: *un sistema que hace X*, siendo *X* un *proceso de transformación* particular; es decir, *X* es *T* desarrollada. Hasta aquí tenemos el *QUÉ*. La forma de llevar a cabo el proceso queda a libre decisión. Pero es conveniente limitar desde el principio el sistema a un *CÓMO* particular. Aquí la definición raíz toma la forma: *un sistema que hace X mediante Y*. Dado que es necesario identificar al dueño, *O*, la definición raíz puede tomar la forma completa: *un sistema que hace X mediante Y para lograr Z*. Entonces *T* implica la transformación y *Y* los medios; *Z* tendrá que ver con las intenciones a largo plazo de *O*, debiendo existir una relación lógica que haga que *Y* sea el medio apropiado para realizar *X*.

Esta formulación precede lógicamente a la construcción del modelo, ya que de otra manera sería impreciso y, seguramente, improvisado. Para seleccionar los sistemas relevantes, y teniendo en cuenta que estos pueden tener significado a niveles diferentes, es necesario indicar, para cada definición raíz, el nivel que ocupa en la jerarquía sistémica (recordemos que esta define “un sistema”¹⁵¹). Incluidos en este sistema (el definido por la transformación), estarán las actividades individuales interrelacionadas (subsistemas) que permiten lograr la transformación propuesta. El nivel superior será el del ambiente (sistema ampliado), el sistema del cual *T* es uno de sus subsistemas. Es el nivel del dueño del sistema, la “*O*” del CATWOE. Es el nivel que puede detener las acciones

151. Siempre es preciso tener en cuenta que los sistemas son jerárquicos y por otra parte, hemos dicho que el sistema descrito por la definición raíz, debe incluir, más allá de las tareas primarias, sus visiones, sus esperanzas.

del sistema. En esencia, se deben considerar al menos tres niveles en la construcción de un modelo: El sistema (el “qué”), Los subsistemas (los “cómo”), y el sistema ampliado (el “porqué”).

11.1.4.3 Modelo conceptual

La elaboración del modelo se deriva de la definición raíz. Es un proceso de concepción. Es el cómo enfrentar el problema. Estos modelos conceptuales no son una descripción del mundo real. Una comparación de igual con igual no puede sugerir cambios interesantes para mejorar las situaciones problemáticas estudiadas. No son modelos que consideran partes del mundo real; son modelos pertinentes para debatir cambios del mundo real. El enfoque es epistemológico, no ontológico como bien lo señalan Checkland & Scholes (1990, p. 41-42). No debemos confundir al pensamiento de sistemas acerca del mundo real con un lenguaje para el mundo real.

Por esta razón, a menudo es bueno referirse a ellos como “holones” para evitar la confusión con la palabra sistema que es utilizada, a menudo, como una manera de referirse a algo (metalenguaje) en lugar de ser utilizada como lenguaje objeto: una construcción mental de algo que queremos reconocer como sistema.

La definición raíz es la fuente de los holones (sistemas, constructos mentales) con propósito (de los sistemas de la actividad humana). El asunto ahora es proponer el mínimo de actividades (verbos) que sean necesarias para lograr el proceso de transformación a la luz de los elementos del CATWOE. Estas actividades (que son subsistemas con propósito) deben interrelacionarse lógicamente de tal manera que destaquen la dependencia que tienen entre sí. También se debe incluir un subsistema de control que se aclarará más adelante.

11.1.4.4 Comparación

Debemos ahora hacer una *comparación del modelo con la realidad percibida*. Aquí confrontamos el modelo conceptual y la situación que se desea mejorar. Tal comparación puede hacerse en términos generales (por ejemplo de los modos de operación y de la estructura del sistema) o en términos muy específicos. En general se observa qué actividades, decisiones o información, que

el modelo conceptual propone, no se cumplen o no existen en la realidad. Una buena idea es definir una matriz que permita realizar tal comparación. De todo lo anterior surge un cuadro para proponer acciones concretas: los cambios que deben mejorar la situación problemática actual. La figura 11.8 es una forma de hacerla.

Actividad	¿Existe o no en la realidad?	¿Cómo se hace?	¿Cómo se juzga?	Comentarios
1. ----- 2. ----- 3. -----			Criterios y juicios actuales	Nuevos “Qué”. “Cómos” alternativos etc. (Ideas para el cambio)
Conexiones 1 → 3 2 → 4, 7				

Tabla de comparación modelo realidad

Fig. 11.8

Pero con lo dicho hasta ahora, no es suficiente para que ellos sean realmente cambios fundamentales. Esta parte nos asegura, hasta cierto punto, que los cambios son *sistémicamente deseables*. Pero ¿serán aceptados sin dificultad? El estudio de la otra corriente nos dará la respuesta.

11.1.5 La corriente de investigación basada en la cultura

Checkland destaca que así como los hechos y la lógica juegan un papel importante en los asuntos humanos, el sentido que tengamos de ellos tiene igual trascendencia. Este aspecto surge de los *mitos y significados* que las personas atribuyen a sus prejuicios y dificultades tanto profesionales como personales con respecto a sus semejantes, en lo referente a la transformación estudiada. No es suficiente con identificar una percepción sin el significado que ella tenga

para las personas; tal percepción tendría poco valor para enriquecer el proceso de aprendizaje sobre la situación en estudio. De hecho, incluir los sentidos, significados y en general la cosmovisión de las percepciones, es fundamental para la aceptación de las propuestas que surjan durante el proceso.

11.1.5.1 Dibujo enriquecido

Se trata ahora de ilustrar gráficamente toda la situación problemática incluyendo las relaciones entre los diferentes componentes del sistema tratando de descubrir los mitos y significados explícitos e implícitos que surgen de tales relaciones. Los dibujos son invaluable como elementos para iniciar una discusión exploratoria con las personas involucradas en la situación estudiada. De alguna manera explica la cosmovisión de quien(es) hace(n) el estudio (los “solucionadores”) y permite compararla con las otras cosmovisiones de los interesados (consumidores, stakeholders¹⁵²). Para realizar tales dibujos es necesario asir los elementos claves de la situación a través de una impresión de primera mano. Se pueden resaltar rasgos, relaciones, emociones que difícilmente podrían expresarse por medio de palabras. La discusión con las partes interesadas no sólo mejorarán el dibujo sino que permitirán un excelente inicio de la corriente cultural, destacando diversas cosmovisiones, que son los temas de los análisis uno, dos y tres. La figura 11.11 es un intento de lograr una visión enriquecida de la transformación “profesores sin postgrado” → “profesores con postgrado”, en un ejemplo que se presentará más adelante. Obviamente esta concepción es susceptible de mejorarse a medida que el estudio avanza.

152. Stakeholders: término inglés utilizado por primera vez por R. E. Freeman en su obra: “Strategic Management: A Stakeholder Approach” (Pitman, 1984), para referirse a «quienes pueden afectar o son afectados por las actividades de una empresa». Estos grupos o individuos son los públicos interesados o el entorno interesado (“stakeholders”) que, según Freeman, deben ser considerados como un elemento esencial en la planificación estratégica de los negocios. La traducción de esta palabra ha generado no pocos debates en foros de Internet, aunque son varios los especialistas que consideran que la definición más correcta de “stakeholder” sería *parte interesada* (del inglés stake, apuesta, y holder, poseedor). (Wikipedia).

11.1.5.2 Análisis de la intervención (roles)

La intervención misma es una situación problemática. Para analizarla se ha encontrado que debe mirarse desde tres roles distintos: cliente, "solucionador" y dueño.

El papel "cliente" es el de la persona o personas que fueron la causa de que el estudio se llevara a cabo y que tienen razones para ello. La pregunta de base es ¿quién(es) tiene(n) el papel del cliente(s)? Es necesario, pues, mantener en mente las razones que originaron la iniciación de la intervención (el estudio) y tenerlas en cuenta, aunque no de manera dominante. El cliente puede ser o no, adicionalmente, el dueño del problema.

El papel "posible(s) solucionador(es)" es el de quien o quienes tienen a su cargo el control del proceso (la aplicación de la metodología) y la ejecución del mismo. Aquí interesa tener en cuenta *las percepciones, el conocimiento y la capacidad de conseguir recursos*.

El "dueño" es (son) quien(es) percibe(n) la situación problemática. El papel "dueño" *es decidido* por el "solucionador". No hay nadie que sea intrínsecamente el dueño. Puede estar en la lista de los clientes o de los "solucionadores". A este respecto puede ser de mucha utilidad el siguiente análisis.

El proceso de mejoramiento puede considerarse como un puente entre la situación en el mundo real y la concepción que se tenga de ella. La primera es generada por el dueño, la segunda, por el "solucionador". La figura 11.9 (adaptada por el autor) muestra esta relación.

En ella se distingue el *sistema que contiene al problema* (Problem Content Systems o PCS) que contiene el rol del dueño, y el *sistema que resuelve el problema* (Problem Solving Systems o PSS) que contiene el rol del "solucionador". El PSS es un equipo. El "solucionador" del problema utiliza la metodología para realizar acciones que buscan mejorar aspectos del sistema que contiene el problema. El PCS y el PSS no son separables como ocurre en las ciencias naturales; en estas pueden existir acuerdos en la definición del contenido de un problema y pueden existir diferentes "solucionadores" en sitios diferentes. Por ejemplo, la enfermedad de la sífilis era conocida ya desde el siglo XV. El problema, el PCS, estaba definido y aceptado universalmente. Diferentes investigadores, en diferentes épocas (el PSS) intentaron dominar esta enfermedad. El salvarsán, descubierto en 1939, y más concretamente la sulfonamida, finalmente resolvió

“Solucionador” y dueño son roles. El diagrama debe leerse empezando en el rol del “solucionador”.

Relación entre el PSS y el PCS

Fig. 11.9

el problema. Este no es el caso en los problemas blandos. *PCS* y *PSS* son una parte integral de la situación problemática. Preguntarse sobre los propietarios (*O*) de la situación problemática y los recursos disponibles para su mejora, y escribir las respuestas, es importante ya que permite vislumbrar la *weltanschauung* del estudio mismo, lo que mejorará la comprensión de la situación por parte del “solucionador” del problema.

Hay varias opciones para asignar los roles y varias posibilidades de describir el *PSS* y el *PCS*. Una manera eficiente de iniciar un estudio sistémico es hacer preguntas acerca de esto y describirlos.

Si hacemos del “solucionador” un posible “dueño”, el primer sistema relevante que aparece es “el sistema para hacer el estudio”. El *PSS* se vuelve una parte del

PCS. Pero, obviamente, hay otras posibilidades de encontrar “dueños”. Por eso este aspecto es tan trascendental, y se conoce como *Análisis uno*.

La escogencia de posibles dueños es un trabajo de imaginación, obviamente soportado por un buen conocimiento de la situación a estudiar.

La dificultad inherente a “conocer” un sistema de la actividad humana, se ve aún más reforzada por las imprecisiones del lenguaje. Conceptos que deben ser lenguaje objeto, se deslizan fácilmente al nivel de metalenguaje. Recordemos que en el capítulo 1 comentábamos que la depuración del lenguaje de la Ciencia Social está por realizarse.

Debido a que los términos técnicos de cualquier enfoque específico utilizan palabras que tienen sentido en el uso cotidiano (en la SSM los términos técnicos incluyen “cliente”, “solucionador de problemas”, “dueño del problema”, “sistema relevante”, “comparación”, etc.), es importante, al utilizar el enfoque, manejar su lenguaje con un especial y cuidadoso rigor. “La vida es más fácil para los científicos de la naturaleza. Pueden hablar del ‘spin Hamiltoniano’ y de ‘coeficientes de difusión’ y saber que no son mal interpretados” (Checkland-& Scholes, *Op. Cit.* p. 48).

11.1.5.3. Análisis del “Sistema Social”

Nuevas conceptualizaciones irán enriqueciendo el dibujo de la definición raíz y nuevos “solucionadores” y “dueños” harán su aparición a medida que el Análisis Uno se vaya utilizado. Igual situación se presenta en el análisis del sistema desde una perspectiva social. Para esta fase, se ha encontrado que es muy útil considerar a un “sistema social” como interrelaciones continuas de tres elementos: roles, normas y valores. Cada uno de ellos redefine y es redefinido por los otros dos. La figura 11.10 da una idea de este modelo.

Un *rol* es una posición social reconocida como de importancia por la gente en la situación problemática. La posición puede ser institucional (“investigador”, “jefe de Almacén”, “estudiante”) o de comportamiento (“tramitador”, “gestor”, “agente de bolsa”, “político”).

Las *normas* son los comportamientos esperados cuando se está en un papel determinado. Hay normas que debe seguir un profesor, y otras que debe seguir un estudiante. Las actitudes que tengamos cuando efectuamos un rol son juz-

Elementos claves en un sistema social

Fig. 11.10

gadas de acuerdo con ciertos estándares llamados *valores*. Se juzga de manera diferente al profesor y al estudiante; los valores asociados son distintos, aunque existen valores generales que rigen por igual cualquier desempeño. Así, en algunas universidades los roles más reconocidos son de tipo profesional como por ejemplo la suficiencia investigativa; en otras lo que prevalece son los roles relacionados con la conducta como ciudadano o la capacidad de transmitir el conocimiento vigente. Este tipo de consideraciones permite enmarcar la situación problemática (al sistema que la define) dentro de ciertos contextos lo cual facilita enormemente su estudio. Por ejemplo, en una universidad dada es posible que se prefiera el rol de profesor-investigador al del rol profesor-docente.

Esto se conoce con el nombre de *Análisis Dos*. Se diferencia del *Análisis Uno* en que el conocimiento adquirido no siempre se logra a través de preguntas directas. Durante este análisis debemos conocer continuamente (ya sea en cada conversación, reunión, lectura de documentos etc.) los roles, normas y valores que nos permitan extraer un conocimiento mejor de la situación problemática.

11.1.5.4 Análisis del “sistema político”

Se conoce como el *Análisis Tres*. Se parte de la base de que cualquier situación humana tiene una dimensión política que debe ser tomada en cuenta durante el estudio de la situación problemática. El término *política* se toma aquí como “el arte de lograr acuerdos entre desacuerdos”. Es la manera como se puedan lograr

convenios entre diversos intereses. Estos ajustes descansan en la distribución del poder. Podríamos redefinir la política como la *actividad relacionada con el poder cuyo interés es manejar las relaciones entre intereses diferentes*.

No existe actividad humana que esté exenta del aspecto político. Aún los estudios académicos más científicos no escapan a este hecho. Son bien conocidas las implicaciones políticas de las investigaciones que se realizan aún dentro de la ciencia pura. De hecho, si se consideran sólo los aspectos económicos, la mera distribución de un presupuesto ya es un asunto político.

El modelo que nos puede ayudar aquí es el preguntarnos sobre algunos asuntos, como por ejemplo: ¿Cómo el poder se manifiesta en la situación estudiada? ¿Cuáles son las encarnaciones del poder? ¿Cómo se expresa el poder cuando se llega a cierto tipo de acuerdos? ¿Cómo se logran estos acuerdos, cómo se usan, se protegen, se preservan, se transmiten, se abandonan? ¿Cuáles son los mecanismos? (Checkland & Scholes, *Op. Cit.*, p. 61).

Algunas de las encarnaciones de poder, es decir, el porqué y quién tiene el poder, que han sido descubiertas a través del uso de la metodología son: autoridad oficial (basada en los roles), autoridad intelectual, pertenencia o no a ciertos grupos, autoridad profesional, acceso a cierto tipo de información, carisma personal, etc.

El Análisis Tres es especialmente delicado debido a que pueden ponerse en evidencia debilidades que, de ser conocidas, afectarían seriamente al sistema en lugar de mejorar la situación actual y a su vez podrían convertirse en nuevas manifestaciones de poder. Como afirman los autores no se trata de una metodología maquiavélica para darle consejo al “príncipe” de cómo dividir y reinar. El fin de la metodología es mejorar situaciones mediante acuerdos entre los interesados. Se debe ser muy cuidadoso y no permitir que este tipo de información afecte negativamente el proceso de mejora.

Los tres Análisis permiten enriquecer la visión de la situación problemática. Permiten también identificar sistemas relevantes, nombrarlos, así como reconocer las interrelaciones existentes entre ellos lo cual facilita el proceso de modelado. Siempre debemos tener en cuenta que esta corriente debe interactuar continuamente con la corriente lógica. Pero el proceso debe llevarse mucho más allá de los simples hechos de evidencia inmediata.

11.1.6 Cambios factibles y deseables

Hemos resaltado continuamente que la idea final es lograr modificaciones que mejoren la situación problemática en estudio. Las dos corrientes convergen en un debate, en el cual se espera que se lleguen a acuerdos sobre este punto.

A menudo es necesario utilizar la metodología para desarrollar los procedimientos de cambio.

La implementación es, naturalmente, una “situación problemática” en sí, y es común utilizar la *MSB* para enfrentarla. Podemos conceptualizar y modelar sistemas para implantar los cambios y hacerlo teniendo en cuenta diferentes *Weltanschauungen* relevantes. Finalmente podemos precisar “un sistema para realizar cambios” cuyas actividades se conviertan en acciones del mundo real. Podemos empezar a realizar las actividades de este modelo final en la situación estudiada (*Ibid.*, p. 62).

En esta parte se hace sensible hasta dónde la metodología permitió que los realmente interesados jugaran un papel de importancia durante todo el proceso. El hombre de sistemas puede indicar y defender una sugerencia particular, pero la decisión para la acción sólo puede ser llevada a cabo por los interesados. Si en los sistemas duros el “diseño” es el “diseño del sistema a ser manipulado” permitiendo el uso de técnicas de optimización, simulación etc., en los blandos esto no es posible. El diseño se entiende como la propuesta para un cambio obtenido a partir de la definición raíz, del modelo conceptual y del proceso de comparación. Diseñar no es, en esta metodología, la creación de algo que funcionará de una manera específica, a “prueba de gente”, y que logrará un objetivo definido; al contrario, es la creación de algunas modificaciones para que sus propósitos pueda llevarse a cabo, acordes con las cosmovisiones de los integrantes.

Checkland señala que el diseño en esta metodología es una actividad más bien específica para una situación particular, en un tiempo particular, que considera gente particular y una historia particular. Se sugiere que la situación sea tratada como si fuera una “situación problemática” y se le aplique a este nuevo problema la metodología discutida.

Los cambios deben ser sistémicamente deseables y culturalmente factibles. La corriente lógica garantiza que los cambios a proponer sean sistémicamente deseables, es decir, que desde el punto de vista lógico, el modelo responda a una secuencia razonable de acciones que deben conducir, necesariamente, a

mejorar la situación problemática. Por otro lado, si se han tenido en cuenta los mitos y significados de las personas relacionadas con el sistema, los cambios propuestos no deben reñir con la cultura imperante; serán culturalmente factibles.

11.1.7 Algunas consideraciones adicionales

Nada peor que proponer cambios, desde el punto de vista de quienes “solucionan” la situación, que sean sistémicamente factibles y culturalmente deseables. Esta inversión, más común de lo que podamos creer, es la causa del fracaso de muchos proyectos. No es el hombre de sistemas, ni quienes administran el sistema, los llamados a decidir qué es lo mejor para una comunidad. Tal vez nos parezcan extraños ciertos tipos de comportamientos y ciertos gustos. Pero si estos forman parte de la cultura, *si tienen sentido* (significado), debemos respetarlos y aceptarlos.

Muchas personas usan la metodología libremente perdiendo de vista su verdadero sentido. La metodología debe utilizar un proceso cíclico de aprendizaje con el uso de modelos de sistemas dentro de ese proceso. Aunque en las organizaciones hay diferentes evaluaciones de las situaciones que se presentan, dichas evaluaciones deben coincidir en algunos puntos pues, de lo contrario, la organización no tendría sentido.

Corriendo el riesgo de simplificar diremos, en una apretada enumeración, que la metodología desarrolla las siguientes actividades (no necesariamente en el orden presentado y todas ellas interrelacionadas):

- Hallar una situación de “inconformidad”.
- Seleccionar algunos sistemas de actividad humana relacionados con la situación.
- Expresarla pictóricamente como un sistema.
- Elaborar modelos de estos sistemas partiendo de transformaciones específicas.
- Usar los modelos para contrastar la situación real.
- Usar el debate iniciado en la comparación para definir acciones con propósito que alivien la inconformidad.

- Tomar las acciones que modifiquen la situación... Y el “ciclo” se reiniciará.

Finalmente, debe indicarse que es necesario hacer un estudio retrospectivo no sólo en cada una de las fases sino al final del proyecto. Pueden ocurrir cambios en las actividades y surgir nuevas experiencias que obliguen a reconsiderar las definiciones raíz y por lo tanto, rectificar el proceso.

11.2 Un ejemplo

Consideremos el caso de la formación de docentes (postgrados), y el desarrollo de la investigación, en una facultad de una universidad dada. La sensación de inconformidad es:

Los estudios de postgrados así como la investigación, son más fruto de intereses individuales de los profesores que una estrategia de una facultad.

Una transformación pertinente podría ser:

<i>Estudios de postgrado e investigación sin direccionamiento</i>	→	<i>Estudios de postgrado e investigación con direccionamiento</i>
---	---	---

La cosmovisión es: una visión integrada de la docencia y la investigación con respecto a los propósitos de la facultad en cuestión.

El dibujo de la figura 11.11 da una visión enriquecida de la situación problemática, el cual se ha originado en las experiencias del autor con personas relacionadas con el tema.

Es importante resaltar que en este caso, es la cosmovisión de quien propone el esquema (el autor) la que predomina. Tal esquema será la base para proponer debates que permitan mejorar el dibujo y por lo tanto tener una visión más cercana de la realidad, de acuerdo con las percepciones de las personas que estén relacionadas con la situación problemática. Aquí se hace necesaria una apreciación. Cuando de un trabajo de investigación se trata y si no se tiene clara el sistema de la actividad humana a considerar, la metodología debe aplicarse, partiendo de consideraciones e intuiciones personales, para adquirir una idea

Dibujo enriquecido de la concepción del sistema.
W: Investigación y postgrados alejados del currículo.

Fig. 11.11

aproximada de cómo podría ser el acercamiento al sistema real. Hecho este ejercicio, se dispondrá de suficientes bases para decidir el sistema a estudiar y la forma de acercarse a él mediante la metodología descrita.

El PCS está definido por la administración, los profesores y los estudiantes de la facultad.

Las tareas primarias son entre otras: proponer reformas curriculares y mantenerse al día con respecto a los campos de la administración y la investigación relacionados con los objetivos de la facultad.

Es evidente que existen tensiones tales como el deseo de independencia por parte de los investigadores, generada entre otras, por la dificultad que se presenta para trabajar en grupo ya que tanto el Estado Colombiano como la Universidad, sólo reconocen a un profesor como el merecedor del control

del proyecto, de la posibilidad de viajar para presentar las investigaciones resultantes y de beneficiarse con gran parte de los puntos que le permiten mejorar su situación económica. En cuanto a los aspectos políticos, el comité curricular decide generalmente en forma autónoma las reformas a proponer y éstas son presentadas al Consejo de Facultad que, en general, poco modifica tales propuestas.

Podemos intentar ahora la siguiente *definición raíz*, la cual necesariamente será reconsiderada a medida que avanza el proceso de aplicación de la metodología.

Se busca desarrollar un sistema que permita que los profesores realicen sus estudios de postgrado mediante direccionamientos claros que reflejen una integración entre la docencia, la investigación y la extensión con el fin no sólo de preparar profesionales que puedan prestar un buen servicio al país, sino también solucionar problemáticas ambientales que afecten a la región.

Desde un punto de vista técnico tenemos el siguiente análisis.

C: Estudiantes, profesores, la comunidad.

A: Profesores, administración de la facultad.

T: Profesores con postgrados.

W: Docencia, investigación y extensión integradas a la problemática ambiental de la región y el país.

O: Profesores, administración.

E: Resistencia al cambio, reglamentos actuales.

Un modelo conceptual acorde con la definición raíz, puede ser el indicado en la figura 11.12. Los números son sólo una identificación de la actividad; la secuencia la dan las conexiones entre subsistemas y no la numeración de los mismos.

Insistiremos: este *no es un modelo de la situación actual*. Es un modelo ideal de cómo debiera ser el procedimiento a la luz de las consideraciones que la metodología nos permite descubrir.

Tampoco es una utopía. Está centrado alrededor de actividades reales y acordes con los significados que tales actividades tienen en la facultad en cuestión. Por esta razón nos permite establecer diferencias que serían las mejoras a llevar a cabo, con el fin de aliviar la sensación de inconformidad que originó el es-

Modelo conceptual del proceso de formación de postgrado de un profesor

Fig. 11.12

tudio. Este modelo debe ser repensado a la luz de las experiencias adquiridas durante el proceso, pues se necesita mucha discusión y revisión de la situación para proponer algo realmente efectivo. Sin embargo, destaca, de un lado, la importancia de relacionar, en forma lógica, las actividades lo que no siempre es fácil de establecer. Por otro lado da una visión global de la situación a tratar. Las partes han sido definidas a partir del todo.

Con respecto al monitoreo y control podemos decir lo siguiente. La eficiencia la podemos medir al observar el número de lecturas realizadas por los encargados en estar al día en los temas administrativos y de las problemáticas ambientales y a partir del número de propuestas hechas por semestre. La eficacia se medirá con la relación que exista entre las propuestas hechas y el currículo de la facultad.

La efectividad –medida a largo plazo–, será la consistencia entre la docencia, la investigación y el servicio a la comunidad a lo largo del tiempo.

El modelo debe ahora confrontarse cuidadosamente con la definición raíz y, particularmente, con el CATWOE. Este procedimiento es necesario para que el siguiente paso pueda llevarse a cabo con seguridad y confianza: los cambios factibles y deseables (Ver figura 11.13).

Actividad	¿Existe?	¿Cómo se hace?	¿Cómo se juzga?	Comentarios
1-Proponer un grupo.. adm.	No			Idea a proponer y debatir.
2-Proponer un grupo ...inv.	No			Otra idea a proponer y debatir.
3-Investigar la...	No			A proponer y debatir.
4-Presentar ideas...	Si	Parcial. En forma individual.	Se considera la forma correcta de hacerlo.	La idea es romper el esquema individual.
5 - Debatir ideas...	Parcial	En muy pocas oportunidades y sin efecto.	Para muchos no está bien.	Se busca más participación.
6-Actualizar el currículo.	Si	Participan unos pocos.		
7-Proponer líneas de...	Parcial	Interés personal.	Para muchos no está bien.	
8-Proponer líneas de formación.	Parcial	Interés personal.		

Tabla de comparación. Bases para sugerir cambios

Fig. 11.13

11.3. Resumen.

De las metodologías duras pasamos a las metodologías blandas, aquellas en las cuales la medición y predicción no son lo importante, sino la consideración de aspectos de carácter interpretativo que permiten estudiar los sistemas desde diversas perspectivas. Dedicamos este capítulo a la metodología de P. B. Checkland.

Esta metodología no busca resolver problemas sino mejorar situaciones problemáticas. Se fundamenta en un proceso de aprendizaje que busca conocer lo que entendemos como sistema de la mejor manera posible y dentro de un lapso de tiempo prudencial. La meta es que, a partir de esta comprensión, surjan las propuestas que van a permitir cambios sistémicamente deseables y culturalmente factibles, no desde la perspectiva de quienes realizan el estudio o han influido para que se lleva a cabo, sino de las personas o grupos que conforman dicho sistema.

Su herramienta de base son las “sensaciones de inconformidad” o “deseos de mejora” (los síntomas) lo cual toma cuerpo en cada transformación: la definición raíz nos dirá “qué” es el sistema deseado y el modelo conceptual nos dirá “cómo” llevar a cabo dicha transformación.

Dos corrientes acompañan este proceso: la cultural, que permite considerar el constructo mental que identificamos como sistema desde una perspectiva social y política donde se tiene en cuenta los efectos de la intervención. La otra corriente es la del proceso lógico que surge de la aplicación de los conceptos de la T.G.S. a las transformaciones. Se trata de la lógica soportada por la corriente cultural con el fin de obtener propuestas que sean útiles a quienes conforman la situación problemática.

CAPÍTULO 12

METODOLOGÍAS BLANDAS. DINÁMICA DE SISTEMAS BLANDOS

12.0 La Dinámica de Sistemas Blandos

En 1990, Peter Senge publicó el libro *La quinta disciplina* el cual abrió nuevos horizontes al uso de herramientas provenientes de la cibernética en los campos de la administración y de los sistemas de la actividad humana (Senge, 1992). La obra está dirigida fundamentalmente a las empresas, pero no es difícil comprender que sus posibilidades pueden extenderse a otros tipos de organizaciones.

Senge propone que las empresas modernas deben ser inteligentes, deben tener capacidad de aprendizaje. En sus palabras (*Ibid.* p. 11-12):

Al crecer la interconexión en el mundo y la complejidad y el dinamismo en los negocios, el trabajo se vincula cada vez más con el aprendizaje. Ya no basta con tener una persona que aprenda para la organización, llámese Ford, Sloan o Watson. Ya no es posible “otear el panorama” y ordenar a los demás que sigan las órdenes del “gran estratega”. Las organizaciones que cobrarán relevancia en el futuro serán las que descubran cómo aprovechar el entusiasmo y la capacidad de aprendizaje de la gente en *todos* los niveles de la organización.

El autor propone *cinco disciplinas* (cinco nuevas tecnologías) para innovar las organizaciones inteligentes: el *dominio personal*, los *modelos mentales*, la *visión compartida*, el *aprendizaje en equipo* y el *pensamiento sistémico* (la quinta disciplina). Aunque nuestro interés se centrará en el pensamiento sistémico, haremos un recuento rápido de cada una de ellas.

El *dominio personal* se refiere al desarrollo de la capacidad de mejorar continuamente nuestra propia visión. Es el dominio de nosotros mismos sobre nuestras debilidades y prejuicios que nos dan visiones de mundo equivocadas y nos impiden escuchar y comprender a los demás; es ser capaces de enfrentarnos a nosotros mismos, de cambiar. Es aprender a esperar, a tener paciencia. Gira

en torno a la claridad que debemos lograr respecto a aquello que nos interesa verdaderamente. Desde el punto de vista sistémico, se trata de descubrir nuestros verdaderos objetivos, no los objetivos declarados.

Los *modelos mentales* se refieren a aquellos supuestos que tenemos profundamente arraigados, a los prejuicios que nos impiden ver el mundo de una manera diferente a como siempre lo hemos concebido y evaluado. Debemos aprender a revisar nuestras aprehensiones, a no juzgar de primera instancia, a someter todas nuestras imágenes a un cuidadoso análisis, trayéndolas al exterior y confrontándolas con la realidad. Es comprender al otro, “meternos en sus zapatos”.

Construir una visión compartida es la base del verdadero liderazgo. Los valores, metas y misiones, si no son compartidos, jamás podrán respetarse ni lograrse. No debe ser una orden la que mueva la acción sino el deseo y la voluntad. Una visión compartida no puede ser la del dirigente o líder de turno o aquella que surge en un momento de crisis. “Es contraproducente tratar de imponer una visión, por sincera que sea” (Senge, 1992, p. 19).

El *trabajo en equipo* es un proceso que debe “aprenderse”. A menudo preferimos trabajar solos, aislados. Esto fue posible en épocas anteriores, pero actualmente se hace más evidente que un buen grupo produce mucho más desde el punto de vista de la creatividad y el talento, que las producciones individuales de sus integrantes, cuando saben cómo trabajar asociadamente¹⁵³. Hay pues, emergencia sistémica. El gran secreto aquí es el *diálogo* como precursor a la *discusión*. En el diálogo se “suspenden los supuestos”, escuchamos a los demás sin aprehensiones, aprendemos de los otros en forma abierta y sincera. Esto evita tomar posiciones extremas, a veces imposibles de defender. El diálogo nos hace ver en dónde podemos estar equivocados, en qué parte puede fallar nuestra argumentación, y en dónde nuestros argumentos son sólidos. Nos da las herramientas con las cuales, posteriormente, podamos entrar en el terreno de la discusión con un conocimiento más profundo de nuestro pensamiento, y sin una alta carga emocional.

La *quinta disciplina* –el pensamiento sistémico– es la que permite que las cuatro anteriores se integren y formen un todo, pues han existido desde hace mucho tiempo pero en forma independiente. Integrarlas es lo que permite dar fuerza a una organización para salir adelante en un mundo tan competido como el

153. Es importante discutir estas ideas a la luz de las propuestas que están surgiendo de la Teoría de la Complejidad aplicada a la administración. *Cfr.* Cap. 8.

actual. Con lo anterior logramos: un dominio personal, modificar nuestros modelos mentales, aprender en equipo y construir visiones compartidas, todo esto integrado bajo un enfoque sistémico. Aunque desarrolladas en un contexto organizacional, no parece que sea muy difícil trasladarlas al mundo personal y social. Por otra parte, un pensamiento sistémico sin el apoyo de estas disciplinas no pasa de ser una propuesta teórica, de difícil aplicación. De hecho, una de las dificultades más grandes con que se encuentra el mundo de los sistemas es que una gran mayoría de personas aceptan las ideas sistémicas, les parecen absolutamente naturales y lógicas, pero en la práctica retornan a sus procedimientos tradicionales que les impiden aprender y entender el mundo.

La *quinta disciplina* tiene una herramienta muy poderosa para comprender el comportamiento de los sistemas complejos: utiliza la extensión de los diagramas causales vistos en la metodología de Forrester a problemas de la organización. Se ha encontrado que muchas situaciones complejas aparentemente diferentes comparten, sin embargo, patrones de comportamiento similares. Ellos no son modelos suficientes en sí mismos. Nos permiten, eso sí, adquirir un conocimiento de la naturaleza del problema. Existe en la actualidad más de una docena de estos patrones que han permitido allanar el campo de estudio de estos sistemas. Se les conoce con el nombre de *arquetipos sistémicos*. En lo que sigue trataremos de analizar algunos de ellos, en una rápida mirada. Una referencia imprescindible es “La quinta disciplina en la práctica” (Senge P. et al, 1995).

12.1 Retroalimentación. Demoras Arquetipos sistémicos

Dijimos anteriormente que los diagramas causales son el lenguaje para describir los sistemas complejos. Ellos captan muy bien la no linealidad de los comportamientos a través del concepto de lazo de retroalimentación.

Existen dos tipos de retroalimentación que son la piedra angular de este lenguaje sistémico: los lazos de *retroalimentación positiva* y los *de retroalimentación negativa*. En el numeral 10.3.2 hicimos referencia a estos conceptos.

Un *lazo de retroalimentación positiva* –Senge los llama *lazos reforzadores*– es aquel cuyo comportamiento se ve siempre reforzado. Es el conocido “círculo vicioso”: más leo, más aprendo; más aprendo, más leo. El diagrama correspondiente se indica en la figura 12.1.

Lazo reforzador o de retroalimentación positiva

Fig. 12.1

El lazo también puede leerse: menos leo, menos aprendo; menos aprendo, menos leo. De todas formas, la dirección del cambio es la misma en ambos casos: a más, más; o a menos, menos. Por eso es positivo, es decir, reforzador. En estos procesos un cambio pequeño se alimenta a sí mismo. Es el efecto “bola de nieve”. Hace algunos años se corrió en la ciudad el rumor de que la gasolina iba a escasear. Por la mañana algunos vehículos que tenían suficiente gasolina se dirigieron hacia las estaciones del combustible para llenar el tanque. Esto generó una pequeña cola en la mayoría de ellas. Rápidamente el rumor se fue extendiendo y se vio reforzado por las colas que se estaban formando; hacia la media mañana las colas eran enormes. Nunca hubo escasez. Se generó un lazo de retroalimentación reforzadora.

Un ejemplo impactante de lazo de retroalimentación positiva lo trae Senge (*Op. Cit.* p. 93-94) con respecto a la carrera armamentista entre la Unión Soviética y los Estados Unidos de Norteamérica. El diagrama se indica en la figura 12.2.

La lectura del diagrama es la siguiente. La Unión Soviética construye armas nucleares, lo que Estados Unidos considera una amenaza (más armas, más amenaza). Esta amenaza crea la necesidad de construir armas por parte de USA (más amenaza, más necesidad de armas), lo que a su vez produce la decisión de construirlas (más necesidad, más construcción). Las armas construidas amenazan la integridad de la URSS (más armas USA, mas amenaza URSS). Dicha amenaza obliga a planes de construcción de armas en la URSS (más amenaza, más necesidad de construir armas Rusas), lo cual da como resultado más construcción de armas soviéticas, cerrando el círculo, produciendo un efecto reforzador.

Lo más interesante de esta historia es que la solución está, en principio, implícita en el mismo lazo. Si en lugar de aumentar la construcción se disminuye, esto

Lazo positivo: la carrera armamentista

Fig. 12.2

fuerza al sistema a crear un lazo reforzador de disminución, eliminando, a la larga, la construcción de estas armas, claro está, si esta fuera la única razón. Sabemos que también hay intereses económicos y políticos que juegan un papel muy importante en la carrera armamentista.

El crecimiento típico de un lazo de retroalimentación positiva se muestra en la figura 12.3.

Crecimiento sin límite. Lazo de retroalimentación positiva.

Fig. 12.3

Por su parte, el *lazo de retroalimentación negativa* crea un sistema compensador, una búsqueda de estabilidad. Ello implica la existencia de una meta, implícita o explícita. En este caso el sistema se auto corrige.

La teoría del control automático de sistemas se rige por este principio. El ejemplo del termostato es clásico. Ya lo hemos descrito en diferentes ocasiones. Ahora tratemos de definirle una estructura mediante los diagramas causales. Se trata de mantener un cuarto a una temperatura dada. Para facilitar el ejemplo supondremos que el cuarto está por debajo de la temperatura deseada; el termostato permitirá la entrada de calor hasta que alcance esta temperatura. La figura 12.4 explica el funcionamiento de este sistema.

Lazo de retroalimentación negativa: el termostato

Fig. 12.4

El funcionamiento es el siguiente. Supongamos que queremos una temperatura de 20° C y el cuarto se encuentra actualmente a 10° C. La diferencia de temperatura (o "brecha") es la diferencia entre la temperatura deseada y la del cuarto; para este caso 10° C.

El termostato deja entrar calor de tal manera que la temperatura del cuarto se eleve, lo cual a su vez disminuye la diferencia. Si la diferencia es menor, el termostato deja fluir menos calor, que a su vez eleva lentamente la temperatura del cuarto, disminuyendo aún más la diferencia de temperatura. Cuando esta diferencia sea muy pequeña, el termostato detendrá su funcionamiento.

Analicemos ahora el siguiente caso. Deseamos llenar un vaso con agua. Abrimos el grifo y el vaso comienza a llenarse. A medida que el nivel de agua va ascendiendo, empezamos a cerrar el flujo de agua. Cuando el vaso alcance el

nivel deseado lo cerramos totalmente. Un diagrama causal que describe este proceso es el indicado en la figura 12.5. Si comparamos este esquema con el de la figura 12.4 observaremos que ¡los dos sistemas son isomorfos! Desde cierta perspectiva, este es un buen ejemplo de cómo un sistema determinado y otro animado pueden ser descritos de manera similar.

Llenando un vaso: lazo de retroalimentación negativa

Fig. 12.5

La gráfica que ilustra estos comportamientos la indicamos en la figura 12.6.

Tendencia a un límite. Lazo de retroalimentación negativa

Fig. 12.6

En la curva de la izquierda, el límite se alcanza desde una temperatura inferior (o un vaso vacío). En la derecha, se trataría del enfriamiento de un cuarto caliente, o la desocupación de un vaso lleno de agua.

Es interesante el ejemplo de llenar un vaso para estudiar el impacto de las demoras. Al cerrar el grifo, el flujo de agua merma *inmediatamente*. Imaginemos ahora que entre cerrar el grifo y disminuir el flujo de agua, pasaran unos segundos. Evitar que el vaso se llene convenientemente, sin que se riegue el líquido, se vuelve un proceso que requiere cierto cuidado. En muchos casos, si no fuera por las demoras, los comportamientos serían fácilmente controlables. Este es el tercer elemento fundamental para el estudio de los diagramas causales. Recordemos el ejemplo sobre la jubilación de profesores del numeral 4.2.

Utilizando una metáfora de Senge, si los lazos reforzadores, compensadores y las demoras son los sustantivos y verbos del lenguaje sistémico, los arquetipos sistémicos son las oraciones simples o narraciones sencillas que se cuentan una y otra vez.

Estos arquetipos son una excelente ayuda para desenmarañar la complejidad de muchos de los comportamientos de los sistemas. Dice Senge (1992, p. 123):

La familiarización con los arquetipos sistémicos sin duda contribuirá a solucionar un problema apremiante contra el cual los directivos luchan sin cesar: la especialización y fraccionamiento del conocimiento. En muchos sentidos, la mayor promesa de la perspectiva sistémica es la unificación del conocimiento a través de todas las especialidades, pues los mismos arquetipos se repiten en biología, sicología, terapia familiar, economía, ciencias sociales y ecología y administración de empresas.

Los arquetipos sistémicos permiten que demos un paso firme desde la sola idea o deseo de pensar sistémicamente, a su aplicación. Ellos nos enseñan a reconocer circunstancias similares (isomorfismos) donde aparentemente no existen. Además, nos indican en donde “poner el dedo en la llaga” con el fin de tomar las decisiones correctas en el lugar correcto. El término utilizado aquí es *apalancamiento*; es la metáfora de la palanca la cual permite mover grandes pesos, con fuerzas pequeñas, simplemente si sabemos el mejor sitio dónde apoyarla, dónde apalancar. Estos arquetipos son un llamado de atención para aquellos que son proclives a las soluciones a corto plazo. Veamos algunos de ellos. Nos guiaremos por Senge (1992) y por Braun (2002).

12.1.1 Límites del crecimiento

El síntoma de los procesos en donde puede encontrarse este arquetipo sistémico es muy característico. En un comportamiento típico del sistema, este empieza a crecer cada vez más; de pronto, y sin razones evidentes, comienza a retardar su crecimiento y, en ocasiones, a decrecer.

Por ejemplo: iniciamos con mucho entusiasmo nuestro entrenamiento físico. A medida que progresamos, dedicamos más tiempo al ejercicio. Con el paso de los días empezamos a perder interés a pesar de ciertos esfuerzos por continuar. Finalmente lo abandonamos.

Un líder empresarial, apoyado por técnicas de motivación, logra que su personal adquiera un gran compromiso de trabajo. Cada día que pasa se ve el crecimiento del espíritu de grupo, el compromiso por la empresa, el deseo de trabajo. Poco a poco se observa un decaimiento a pesar de los esfuerzos por intentar retomar el impulso inicial; la organización ha vuelto a la situación original que había llevado a la administración a realizar los talleres de crecimiento y motivación (P. Senge).

En muchas empresas se observa inicialmente un aumento en las ventas. Estas continúan su carrera ascendente hasta que, a partir de cierto momento, empiezan a disminuir su ritmo. La administración toma las medidas del caso y las ventas reinician su ritmo de crecimiento para luego empezar a decaer y no responden a los nuevos intentos de recuperación.

El diagrama causal que explica este comportamiento está compuesto por dos lazos de retroalimentación que interactúan: uno de crecimiento (reforzador) y uno de control (compensador). El diagrama general es el mostrado en la figura 12.7.

Para leer estos diagramas es conveniente iniciar con el lazo reforzador. Consideremos el ejemplo del ejercicio físico (figura 12.8).

Al comienzo, mientras más tiempo pasamos en el gimnasio, obtenemos más desarrollo físico, lo cual nos motiva a pasar más tiempo en el gimnasio (por ejemplo, dedicamos más días a la semana o incrementamos en media hora cada sesión). Es el lazo positivo de la izquierda. Sin embargo, debido a nuestra capacidad de dedicación, que puede estar afectada por otras circunstancias (pereza, motivación por otros asuntos, desarrollo muscular menos notable) el interés por el ejercicio puede verse afectado. Al dedicar más tiempo al gimnasio,

Arquetipo general del límite del crecimiento

Fig. 12.7

Un ejemplo de límite del crecimiento:
el ejercicio físico.

Fig. 12.8

debido a la capacidad de dedicación, nuestro interés por el ejercicio disminuye (es el lazo negativo de la derecha). Si este interés disminuye, disminuirá el tiempo que dedicamos al gimnasio (o, visto de otra manera, a más interés, más tiempo en el gimnasio). La razón por la cual el lazo compensador no entra a actuar inmediatamente, permitiendo que el reforzador ejerza su influencia inicialmente, es debido a la demora que se presenta entre el tiempo dedicado al gimnasio y el interés por el ejercicio (representada por las dos líneas paralelas).

Consideremos el caso de una empresa que comienza a tener éxito con un producto. A medida que las ventas se incrementan, los ingresos también lo hacen. Una parte de ellos se utiliza para contratar más vendedores, por lo

que, de nuevo, las ventas se incrementan. Sin embargo al pasar el tiempo estas comienzan a disminuir. La gerencia general presiona a los vendedores incrementando sus cuotas y despidiendo a los que considera menos eficientes. Sin embargo la situación empeora. La causa: retardo en las entregas de los pedidos. Esto ocurre debido a que se tiene un límite en la capacidad de despacho. Al aumentar los pedidos después de cierto límite, esta demora se incrementa. La dificultad está en que los clientes tardan un tiempo en censarla. Al principio, debido a la calidad del producto, están dispuestos a esperar un poco más. Pero la situación es peor cada vez y, a la larga, hacen los pedidos a la competencia que sí cumple con los plazos de entrega.

Un diagrama causal de esta situación puede ser el siguiente (figura 12.9).

Límite del crecimiento. Ventas exitosas

Fig. 12.9

Nótese cómo el lazo compensador se cierra a través del lazo reforzador (observe la trayectoria en forma de 8 acostado). Cualquier intento que centre su interés en el lazo reforzador con el fin de mejorar la situación, no sólo es inútil sino, peor aún, contraproducente. En efecto. Al ejercer presión en este lazo con el fin de reactivar el crecimiento lo que se logra es que el lazo compensador, una vez vencida la inercia de la demora, tome control del sistema. *A más ventas, ¡menos ventas!* Por esta razón, el apalancamiento debe hacerse en el lazo compensador, bien sea logrando un cambio en la meta –por ejemplo modificar la condición limitante aumentando la capacidad de despacho–o mediante cambios de estrategias o acciones que modifiquen la situación actual, como, por ejemplo, aumentar el precio del producto para disminuir el volumen de ventas. Y es aquí donde las otras disciplinas juegan un papel fundamental, ya

que se requiere mucha voluntad y convicción, pues es muy difícil vencer la resistencia al cambio.

La gráfica del comportamiento de este patrón se asemeja a las indicadas en la figura 12.10.

Patrones de cambio del límite del crecimiento

Fig. 12.10

Al comienzo el sistema empieza a crecer con fuerza, pero poco a poco el lazo compensador frena el crecimiento, e incluso puede ocasionar un decrecimiento en su desempeño. Lo interesante de este análisis es el hecho que, sin ninguna fuerza extraña o ajena al sistema, el lazo compensador aparece. No se trata de buscar “chivos expiatorios”; de culpar a la “alta gerencia” o a una competencia desleal. Su aparición es inevitable y, en muchos casos, necesaria. El crecimiento tiene un límite. Tal vez el ejemplo más dramático lo estamos viviendo al tratar de forzar nuestro planeta “más allá del límite” (Meadows, D., 1972, 1992).

12.1.2 Desplazamiento de la carga

El comportamiento típico es el siguiente. Una situación que crea conflicto es solucionada rápidamente mediante ciertas acciones. Al presentarse la situación de nuevo la solución anterior es aplicada, tal vez con más intensidad, lográndose una mejora. A la larga, ya no es posible seguir recurriendo a este tipo de acción y la situación empeora. Sin embargo, se sospecha que puede existir una solución más radical, pero no se recurre a ella. Es el típico acto de tratar el síntoma sin curar la enfermedad; se apalanca el síntoma en lugar de la solución fundamental. Este es uno de los arquetipos que destaca la lucha entre las soluciones sencillas, sintomáticas, a corto plazo, en lugar de soluciones más radicales, fundamentales, a largo plazo.

Un buen ejemplo es una cefalea¹⁵⁴. El dolor de cabeza intenso se reduce mediante un analgésico común; este desaparece, pero reaparece más adelante, con más frecuencia y mayor malestar. Dosis cada vez mayores del analgésico mitigan el sufrimiento. Finalmente el dolor se vuelve insoportable. Por otro lado, un tratamiento largo, seguramente costoso e incómodo, pueda ser la solución. Pero posponemos estas acciones hasta que ya no podamos más debido a que las soluciones sintomáticas nos “convencen” que no es necesario recurrir a soluciones radicales: es el efecto lateral. La figura 12.11 ilustra este arquetipo.

Arquetipo general de desplazamiento de la carga

Fig. 12.11

El diagrama causal consta de dos lazos compensadores que actúan simultáneamente. Uno de ellos, el síntoma, responde inmediatamente a las acciones tomadas; el otro tiene demoras que hacen que la sensibilidad a la solución permanezca “dormida”. Para colmo, el lazo reforzador sintomático afecta negativamente la capacidad de sensibilidad del lazo con la solución radical. “Desplazamos la carga” hacia la solución fácil.

Senge (ver figura 12.12) comenta cómo los jefes de personal, ante un problema con sus subordinados, recurren a la ayuda de expertos en solución de conflictos,

154. Es importante distinguir entre cefaleas primarias y secundarias. Las primeras se originan en predisposición genética y las condiciones biológicas de la persona como son las migrañas y las producidas por tensión muscular; las secundarias son debidas a lesiones que afectan los mecanismos que regulan la presión en el cráneo.

Desplazamiento de la carga: las asesorías administrativas

Fig. 12.12

quienes, efectivamente, solucionan el problema.

Pero la dificultad del jefe al enfrentar nuevas situaciones (ya que descarga su responsabilidad en los expertos), lo obliga a requerir nuevamente sus servicios. Cada vez está en menos capacidad de resolver situaciones conflictivas, por no desarrollar sus aptitudes gerenciales. Como los expertos “solucionan” el problema vigente, esto ejerce una influencia para no desarrollar sus capacidades administrativas (observe bien el lazo externo; cruza por los dos lazos compensadores). Una gráfica que describe el comportamiento de este sistema puede ser la indicada en la figura 12.13.

El síntoma oscila entre un aumento y una aparente solución, pero siempre con tendencia a aumentar (empeorar) su situación. Por su parte, la solución de este síntoma exige cada vez más intervención. La capacidad para tomar la decisión fundamental cada vez es menor.

Comportamiento del desplazamiento de la carga

Fig. 12.13

Insistimos. Este arquetipo resalta de nuevo la importancia de tener paciencia y dedicarse a las soluciones fundamentales en lugar de soluciones inmediatas que parecen funcionar pero que, a la larga, son contraproducentes.

12.1.3 Erosión de metas

La erosión de metas es un patrón similar al anterior. También resalta la tensión entre las soluciones fáciles y las fundamentales. Sin embargo aquí no hay una influencia directa entre la solución del síntoma y la acción radical (el lazo reforzador externo) ya que lo que se enfrenta es la realización de un objetivo, de un logro a largo plazo. En esta situación se fija una meta. Debido a las dificultades que se van presentando, en lugar de tomar las medidas para lograrla, lo que se hace es modificarla, haciéndola más fácil. El diagrama correspondiente es el de la figura 12.14.

Consideremos el siguiente ejemplo. Me propongo dedicar cinco horas semanales a lecturas ajenas a las relacionadas con mi trabajo. Al cabo de algún tiempo observo que esto no es tan sencillo, debido a presiones de diverso tipo: cansancio, falta de interés, otras actividades. En lugar de hacer un esfuerzo para vencerlas, considero que cuatro horas son suficientes para colmar mis aspiraciones. Y el proceso puede continuar, erosionando la meta inicial.

Senge comenta (*Op. Cit.*, p. 141):

Arquetipo general de la erosión de metas

Fig. 12.14

Las sociedades sufren el acoso permanente de la erosión de las metas: veamos cómo se ha reducido el estándar de “empleo pleno” en los Estados Unidos. El objetivo federal de empleo pleno se deslizó de 4 por ciento en los años 60 a 6 y 7 por ciento a principios de los 80. (En otras palabras, el país estaba dispuesto a tolerar 50 o 75 por ciento más de desempleo como “natural”). Así mismo, 3 o 4 por ciento de inflación se consideraba grave a principios de los 60, pero una victoria de la política antiinflacionaria a principios de los 80.

El comportamiento general de este arquetipo se muestra en la figura 12.15.

Comportamiento del arquetipo “erosión de metas”

Fig. 12.15

En los gobiernos se puede analizar el cumplimiento de los objetivos sobre déficit fiscal o de disminución del desempleo mediante el diagrama mostrado en la figura 12.16.

Reducción del déficit fiscal

Fig. 12.16

En más de una oportunidad observamos cómo la meta de mantener una calidad de alto nivel en una empresa manufacturera es modificada a niveles más bajos debido a la necesidad de reducir los costos de producción. Esta situación claramente está bajo el dominio de este arquetipo. Igual ocurre con las metas de calidad de los productos: lucha entre un estándar (a veces idealizado) y la calidad del producto real. Para evitar este tipo de situaciones, debemos ser muy realistas en la propuesta de las metas a alcanzar. A menudo, de buena fe, proponemos objetivos difíciles o imposibles de lograr.

12.1.4 Soluciones contraproducentes

Este arquetipo describe el caso en el cual se toma una acción para resolver una situación, acción que al principio produce el resultado deseado, pero más adelante, ella misma empeora la situación. Es también un arquetipo que resalta las diferencias entre las soluciones a corto y largo plazo. La figura 12.17 ilustra el diagrama general respectivo.

Arquetipo general de soluciones contraproducentes

Fig. 12.17

Senge trae el siguiente ejemplo. A una rueda que chirría le echamos agua, lo cual quita el sonido molesto. Pero con el tiempo, el agua y el oxígeno producen herrumbre, lo cual acentúa más el ruido. Un comportamiento típico de este arquetipo lo ilustra la figura 12.18.

Comportamiento de “soluciones contraproducentes”

Fig. 12.18

A menudo pensamos que una manera de contrarrestar la violencia en la sociedad es mediante el castigo. Y evidentemente, al principio esto es así. Pero, con el tiempo, el castigo produce odio lo cual acrecienta la violencia.

Frenar la violencia sólo a través del castigo es sin duda, una solución contraproducente. La figura 12.19 ilustra este caso.

Insecticidas, plagas y resistencia a los insecticidas también son situaciones que pueden estudiarse bajo este arquetipo.

Violencia y castigo Una solución contraproducente

Fig. 12.19

Aunque todos los arquetipos indicados, y los que siguen, de alguna manera ilustran la generación de “soluciones contraproducentes”, debido a su mal apalancamiento, este arquetipo se distingue de los demás en que el comportamiento depende de dos lazos, uno positivo y otro negativo, que se originan en los mismo elementos.

12.1.5 Escalada

Dicho comportamiento se hace presente cuando dos organizaciones compiten entre sí y el desarrollo de una de ellas depende de la ventaja relativa que pueda tener sobre la otra. La figura 12.20 ilustra este arquetipo.

Para comprender el diagrama, el lector puede imaginarse dos corredores *A* y *B*. *A* va delante de *B*. Si la distancia entre ambos es relativamente grande, *A* disminuye su actividad (merma un poco la velocidad), lo cual permite que *B* se acerque, ya que *B*, al ver la diferencia en su contra, aumenta su actividad. Esto hace que *A* aumente su velocidad, ocurriendo lo mismo con *B*.

La “guerra de las tapas”, una estrategia utilizada hace varias décadas por las empresas de bebidas gaseosas, puede ser un buen ejemplo. Una empresa importante *A* de estas bebidas inicia una campaña para mejorar sus ventas premiando a sus consumidores por medio de tapas contramarcadas. La competencia *B* hace algo parecido (bien con sus propias tapas o bien con otro tipo de promoción); al aumentar sus ventas, la compañía competidora

Arquetipo general de la escalada

Fig. 12.20

redobla sus esfuerzos en una guerra sin fin, o una con resultados poco deseados para cada una de ellas, salvo que una de las partes sea sensiblemente más fuerte que la otra (como ocurre con los monopolios lo cual corresponde a otro arquetipo que estudiaremos bajo el nombre: éxito para quien tiene éxito), o que las dos lleguen a un acuerdo de no continuar con esta manera de obrar que, para muchos, es el fundamento de la libre empresa capitalista.

Un comportamiento típico lo muestra la figura 12.21.

Comportamiento del arquetipo "escalada"

Fig. 12.21

La razón de esta situación es una visión reduccionista de la competencia: sólo se ve la propia acción sin considerar el efecto que sobre la competencia puede generar.

Este comportamiento es común en los equipos competitivos, como por ejemplo en el fútbol profesional. Los equipos se enfrascan en una lucha por contratar

los mejores jugadores, a lo cual otros equipos toman una acción similar, hasta agotar las posibilidades de compra debido a los altos costos de inversión.

12.1.6 Éxito para quien tiene éxito

Aquí una entidad compite con otra por el mismo recurso hasta que logra dominarla. La figura 12.22 es un diagrama causal de este arquetipo.

Arquetipo general “éxito para quien tiene éxito”

Fig. 12.22

La idea es premiar al mejor, porque esto hace que cada vez crezca más. No es bueno invertir en lo que no sea rentable. Es una especie de reconocimiento al esfuerzo de los exitosos. Esto se logra eliminándole recursos a los menos favorecidos cuyo comportamiento se debe posiblemente a una (aparente) falta de habilidad, inteligencia o interés. El arquetipo sirve para poner sobre la mesa estos supuestos y analizarlos a fondo. Tal vez A y B no tuvieron las mismas opciones cuando iniciaron sus procesos o puede ser que las medidas de comportamiento no sean realmente las más acertadas y favorables para la situación.

Un profesor de piano tiene dos alumnos uno de los cuales, el alumno A, toca mejor al piano que el alumno B. Él debe dedicar 4 horas semanales a cada uno. Como al final del año debe presentar a uno de sus alumnos en un acto final, empieza a dedicar más tiempo a A que a B, con la consecuencia lógica de que

B cada vez toca menos bien, mientras que *A* lo hace mejor. Es la típica actitud docente de dedicar poco tiempo al que más lo necesita: el que sabe menos. El objetivo, en lugar de buscar que los alumnos en general, mejoren, se cambia por el de “presentar el mejor alumno” como prueba de su eficiencia como profesor. El comportamiento general de este arquetipo se ilustra en la figura 12.23.

Comportamiento general del arquetipo
“Éxito para quien tiene éxito”

Fig. 12.23

12.1.7 Tragedia del terreno común

Hardin Garret publicó en la revista *Science* un artículo llamado “La tragedia de lo común” (*Tragedy of the commons*) en el que plantea el dilema según el cual el interés personal y un comportamiento racional, llevan a un mal final. Es la competencia de varios sistemas (formados por ciudadanos ordinarios), que luchan por un recurso común. Cada uno de ellos trata de utilizar dicho recurso lo más que pueda, para lograr su propio desarrollo. Al final, el recurso ha desaparecido prácticamente con resultados negativos para todas las entidades. La figura 12.24 indica un diagrama causal que describe este arquetipo. Se han incluido sólo dos sistemas para facilitar el análisis.

En este arquetipo existen dos lazos de retroalimentación reforzadora: el de cada entidad. La actividad total (actividad conjunta) sobre el recurso hace que éste, al ser limitado, afecte los beneficios que cada cual pueda obtener. Al disminuir los beneficios de cada organización, éstas refuerzan su actividad “predadora” afectando el escaso recurso disponible.

Arquetipo general de la tragedia del terreno común

Fig. 12.24

El comportamiento típico de este arquetipo se muestra en la figura 12.25.

Comportamiento del arquetipo "Tragedia del terreno común"

Fig. 12.25

Consideremos dos familias campesinas que levantan ganado y tienen un pastizal común para utilizar. Evidentemente cada grupo tratará de criar la mayor cantidad posible de cabezas de ganado. Si no existen factores externos que limiten tal explotación (conflictos, caza furtiva, enfermedades) la situación terminará en tragedia. El componente positivo depende del incremento

que produce el animal adicional. Como se reciben todos los beneficios de la venta, para cada familia la utilidad positiva es cercana a +1. Cada familia buscará maximizar su ganancia. La pregunta clave es ¿cuál es el beneficio que obtenemos si aumentamos un animal más a mi rebaño? Esta utilidad tiene un componente negativo y otro positivo que es la clave para comprender el mecanismo del arquetipo.

El componente negativo depende del sobrepastoreo adicional (uso marginal) generado por un animal más. Estos efectos son compartidos por todos los beneficiarios por lo que su utilidad, que es negativa (es una pérdida) depende del uso compartido y, por lo tanto, se consideran que los demás son culpables, asignándoseles un valor de -1. Sin embargo cada familia considera que su efecto sobre el sistema es sólo una fracción de este valor.

La conclusión racional es aumentar más ganado para compensar las pérdidas. Pero esta conclusión, aparentemente lógica para cada familia, es simultánea, y por esto es que surge la tragedia. Cada grupo tiene una visión que los impulsa a incrementar su ganado ilimitadamente, en un mundo limitado. La libertad de los recursos comunes resulta la ruina para todos. Esto es lo que ocurre con los recursos no renovables y los recursos escasos.

La pesca de ballenas, el uso del agua son dos excelentes candidatos para ser analizados bajo este arquetipo.

12.1.8 Crecimiento y subinversión

Se trata de una estructura que parte del arquetipo del límite del crecimiento. Analiza el crecimiento de una empresa que invierte en su desarrollo sus propios recursos, tanto económicos como humanos. La figura 12.26 ilustra la situación.

Sabemos que la demanda, a la larga, disminuirá por causa de su propio incremento, efecto de las limitaciones en la capacidad del sistema. Esta capacidad está afectada por otro lazo de control que hace las veces de un objetivo o meta. La necesidad percibida para invertir, con el fin de aumentar la capacidad del sistema, en general ocurre cuando, debido a la disminución de la demanda, la liquidez de la empresa no es la mejor. Existe un conflicto entre la necesidad de crecer y la exigencia de los dueños o accionistas de la empresa a mejorar sus ingresos. La gente espera “tiempos mejores” mediante políticas que logren un incremento de la demanda, desconociendo las funestas consecuencias. Lo

Arquetipo general “crecimiento y subinversión”

Fig. 12.26

que ocurre es que el punto de apalancamiento está más allá, en el lazo de control afectado por una meta –la pauta de desempeño– que restringe la capacidad de expansión del sistema, es decir, limita sus recursos. Lo correcto es modificar esta meta mediante políticas de aumento de capacidad física, mejora en equipos, preparación del personal etc., es decir, haciendo una inversión, evidentemente costosa, en lugar de escoger como política el ahorro esperando “tiempos mejores”.

El comportamiento general se indica en la figura 12.27.

Comportamiento general del arquetipo
“Crecimiento y subinversión”

Fig. 12.27

Lo anterior no agota los arquetipos sistémicos. Existen más, y todos igualmente interesantes. Con los aquí expuestos, queríamos simplemente ilustrar esta nueva manera de ver las empresas, y por qué no decirlo, el mundo. Finalmente, no debemos olvidar que los arquetipos sistémicos no sólo son partes del sistema total que interesa comprender, sino que son a su vez parte de todo un conjunto de disciplinas que deben trabajar mancomunadamente. Estos patrones nos permiten el diagnóstico y las acciones de curación. El resto del proceso es del dominio de las otras disciplinas.

12.2 Resumen

Continuando con las metodologías blandas presentamos las ideas de P. Senge, las cuales se fundamentan en la dinámica de sistemas pero que tratan de extender su dominio del campo duro, al blando.

En este texto hemos hecho énfasis en el cuidado que se debe tener cuando usamos metodologías (o métodos y técnicas o herramientas) duras en situaciones para las cuales éstas no han sido diseñadas, como lo son las blandas.

Las ideas indicadas en este capítulo muestran cómo, desde un punto de vista estructural, existen isomorfismos entre diversas situaciones del quehacer administrativo que, en principio, no tienen relación entre sí. Planteamos el concepto de “arquetipo sistémico” el cual es de valiosa ayuda para comprender la complejidad de los aspectos administrativos en las empresas modernas. Su fundamento son los diagramas causales, que fueron analizados en el capítulo 10. En muchas oportunidades estos diagramas, convenientemente estudiados, pueden generar modelos de simulación utilizando la dinámica de sistemas, con lo que ésta se convierte en una poderosa herramienta para el estudio de situaciones complejas de las organizaciones modernas. Aún si las organizaciones estuvieran estructuradas a partir de las ideas de la T.C., esto no desmerecería su utilidad.

CAPÍTULO 13

¿ENFOQUE ANALÍTICO?

¿ENFOQUE SISTÉMICO?

13.0 Diferencias entre las Ciencias Naturales y las Humanas

Hemos intentado mostrar dos maneras de enfrentar situaciones del mundo real: a la manera de la ciencia clásica, –reduccionista, mecanicista, lineal–, y a la manera del enfoque de sistemas, –integradora, global, no lineal–. También hemos insistido que no son dos maneras opuestas sino complementarias para poder estudiar e intervenir situaciones complejas. En este capítulo indicaremos el valor que tienen con un ejemplo que, aunque simplificado, destaca los aportes que cada uno de ellos puede hacer ante situaciones de sistemas de la actividad humana.

Antes de continuar, consideremos el cuadro de la figura 13.1, que trata de resumir las principales diferencias.

Haciendo un recuento rápido, la objetividad fue el fundamento del movimiento positivista en la ciencia tradicional, es decir, la separación de sujeto-objeto con el fin de ser “objetivos” frente a los problemas del mundo. Ya vimos que esto no pudo mantenerse cuando la física empezó a estudiar el mundo subatómico. Y por lo que respecta a las ciencias blandas, la subjetividad es parte integral del proceso investigativo. La metodología de Checkland nos enseñó a caminar por este tipo de laberinto del conocimiento.

Con respecto al lenguaje, vimos cómo la depuración del lenguaje de la matemática fue un proceso difícil. La depuración del lenguaje de la ciencia ha sido aún un camino más tortuoso, tanto en la parte correspondiente a las ciencias del estudio de la naturaleza, como para el caso extremo, el de las ciencias humanas.

La experimentación, como base del procedimiento científico, no tiene mayor dificultad para las ciencias naturales, hechas las salvedades indicadas en el numeral 1.1.3.3. En el caso de las ciencias humanas la situación es diferente,

	Ciencias Naturales	Ciencias Humanas
Objetividad (explicación)	Aceptable	Difícil
Lenguaje (precisión)	Preciso hasta cierto punto	Impreciso
Experimentación (comprobación)	Posible, repetible	Difícil, irreplicable
Percepción (comprensión)	Única	Múltiple
Complejidad del fenómeno	Lineal	No lineal
Medición	Posible	Difícil
Definición del sistema	“Fácil”, única	Difícil, múltiple
Posibilidad de decisión	Ninguna	Total

Diferencias entre las Ciencias naturales y las humanas

Fig. 13.1

ya que es posible experimentar con seres humanos sólo bajo condiciones muy restrictivas. Este tema también ha sido discutido a lo largo del texto.

En la ciencia tradicional, la percepción de un fenómeno, una vez establecida una teoría, es única. Para el caso de las ciencias humanas esto no es así como le hemos indicado reiteradamente.

También hemos destacados la gran diferencia que existe entre una visión lineal de los problemas, tal como se hace en la física y química tradicional, y una no lineal, tan común en los problemas humanos. Y cómo la complejidad puede explicarse en parte, gracias a la no linealidad¹⁵⁵.

La medición también es diferente para ambos tipos de conocimiento. En las ciencias naturales es más fácil establecer propiedades medibles. Pero no es así para muchas de las variables que pueden considerarse fundamentales en el comportamiento humano. Si el peso, el volumen, y la temperatura poseen

155. El otro elemento importante es las demoras, como ya se ha indicado.

la propiedad de orden, no ocurre igual con el amor, el deseo de progreso, el sentimiento.

Cuando la percepción de un fenómeno es un acuerdo entre conocedores y tal acuerdo es único, podemos identificar al fenómeno como un sistema. Tal es el caso del sistema planetario. Pero no es así en el caso de las ciencias humanas. Los “objetos de interés” en este caso, son percibidos de manera diferente, por diferentes personas o grupos de personas. Los sistemas aquí son “constructos mentales”. Definir el sistema está íntimamente relacionado con el problema de la percepción a la cual hicimos referencia unos párrafos más arriba.

Respecto a la capacidad de decisión, hemos indicado que mientras en la naturaleza no hay capacidad de decisión, en los seres humanos sí existe tal opción, lo cual establece otra diferencia fundamental entre estas dos grandes áreas del conocimiento.

Hecho este rápido vistazo, pasemos ahora al ejemplo que dio origen al título de este capítulo.

13.1. Bosque industrial

Una empresa maderera mediana posee un bosque que tiene aproximadamente 24 has. y ha iniciado un proceso de explotación tecnificado. Existen 28800 árboles en diferentes etapas de maduración, la cual dura 36 meses, y 800 árboles que pueden ser talados (edad mayor a 36 meses). El terreno de este bosque está dividido en lotes, como se muestra en la figura 13.2.

Los callejones son de aproximadamente 5 metros y el terreno tiene 490 m × 490 m. Cada lote, de 25×25 m², puede contener hasta 121 árboles. Hay en total 256 lotes.

La industria posee una cuadrilla de tala y desbrozo (6 trabajadores), un aserradero donde se procesan los troncos, un sitio de almacenaje y secado, una oficina de ventas, una oficina administrativa con un gerente general y una secretaria, un departamento contable y un departamento de entrega. También existe una cuadrilla de resiembra y mantenimiento de árboles que consta de 5 trabajadores (se les llama “Los de resiembra”). Los obreros de tala y desbrozo trabajan 5 días a la semana (lunes a viernes. Se les llama “Los de tala”). El resto del personal trabaja 4 horas el día sábado.

Plano del trazado del bosque maderero

Fig. 13.2

La empresa utiliza los servicios de una compañía especializada en mantenimiento de equipos pesados.

Mensualmente se solicita material en un promedio equivalente a 800 árboles. El pedido se entrega a la gerencia general, la cual acepta o no el pedido dependiendo de la existencia de material, de la confiabilidad del cliente, de los compromisos adquiridos con anterioridad, etc. En caso de ser aceptado, la orden respectiva pasa a la oficina de ventas la cual hace los asentamientos contables respectivos e imparte una orden de entrega al departamento respectivo.

El material, por política de la empresa, debe ser entregado tan pronto se realicen estos trámites.

La población más cercana se encuentra a 20 km de distancia. Un río atraviesa el bosque, lo cual le da cierta independencia con respecto al régimen de lluvias.

Durante los últimos años el clima de trabajo ha sido relativamente normal. Sin embargo se ha presentado cierta tensión entre los trabajadores, concretamente "Los de tala" y la administración. En conversaciones con algunos empleados se escucha que un posible malestar sea el tiempo demasiado preciso con que se ha calculado lo que talar y desbrozar un árbol se considera como tiempo normal¹⁵⁶.

El gerente, conocedor de diversas metodologías sistémicas, decide enfrentar la situación. Tiene la convicción que, independientemente de si se sospecha que puede resolverse mediante metodologías duras, es mejor verla, en sus comienzos, como una blanda, salvo si las características de la misma no ofrecen dudas al respecto. Utilizará la metodología de P. B. Checkland.

Una opción de definir la situación como un sistema social, de acuerdo con la definición de Ackoff. Se considera al sistema "Empresa" como un sistema con capacidad de decisión. Algunas de sus partes también poseen esta característica; prácticamente todos los subsistemas, menos el bosque que es un sistema determinado. La figura 13.3 es el sistema a analizar.

En conversaciones previas con "Los de tala" se conoce que ellos tienen una serie de quejas. Éstas pueden resumirse en:

- 1) El lenguaje de la comunicación con la administración se ha hecho cada vez más agresivo.
- 2) Las herramientas utilizadas para llevar a cabo las labores de corte y desbrozo de árboles son obsoletas y no se encuentran en buen estado: su mantenimiento es deficiente.
- 3) No se tienen en cuenta las dificultades que se presentan durante el trabajo debido a problemas del clima. Aunque el terreno es aceptablemente plano, existen partes en las cuales las pendientes dificultan el trabajo.

156. Palacios L.C. (2009): El tiempo estándar es el tiempo requerido por un operario normal, calificado y entrenado, con herramientas apropiadas, trabajando a marcha normal y bajo condiciones ambientales normales, para desarrollar un trabajo o tarea, (p. 182). (Cada uno de estos conceptos de normalidad tiene su definición precisa. N. del A.).

La situación vista como un sistema social

Fig. 13.3

- 4) No siempre es posible cumplir con el número esperado de árboles talados. Esto hace que en ocasiones parecería que hubiera una exigencia desmedida respecto al cumplimiento del número de árboles que deben entregarse diariamente para cumplir con los pedidos. A veces es posible cortar más de lo programado, pero otras veces no. Se podría trabajar tiempo extra los sábados para cumplir con los pedidos, cuando fuera necesario.

"Los de siembra", por su parte, se sienten un poco molestos por la actitud de "Los de tala". Éstos continuamente hacen referencia al trabajo "suave" que "Los de siembra" tienen, enfatizando en que la diferencia salarial no refleja el mayor esfuerzo exigido en el proceso de corte y desbrozo. De hecho, los hacen parecer como si fueran débiles.

El personal administrativo considera que las objeciones de "Los de tala" son exageradas. Se han vuelto susceptibles a cualquier reclamo, y no comprenden la importancia de tener los árboles cortados a tiempo, pues de ello depende el éxito de la empresa, ya que a distancias relativamente cercanas se encuentra otra empresa que es una competencia fuerte y que es más antigua, más conocida en el mercado.

El gerente decide analizar la siguiente sensación de inconformidad:

Existe una tensión entre la administración en general y el grupo de trabajadores de talado y desbrozo.

De acuerdo con lo anterior, se proponen varias transformaciones que pueden relacionarse con esta sensación de inconformidad:

Basado en el conocimiento que posee de su empresa, decide iniciar su estudio a partir de la tercera transformación: mala programación → mejor programación. Propone la siguiente definición raíz:

Desarrollar un sistema que proponga una planeación del proceso de tala de árboles, mediante técnicas de programación y control que la administración conozca y pueda aplicar, para reducir la tensión que el proceso actual está generando en la empresa.

Aplicando el CATWOE tenemos:

C: obreros de corte, administración de la empresa.

A: gerente, obreros de corte.

T: programa de talado de árboles actualizado.

W: disminuir tensión entre corte y administración.

O: gerente, obreros de corte.

E: resistencia al cambio, costos, tensión en el clima organizacional.

Durante el proceso anterior de conversaciones y consultas, se observa que existe cierto “mito” o significado respecto al trabajo de “Los de tala”. Por ser

este tipo de oficio uno de mucha exigencia física, estos obreros intentan por todos los medios de no demostrar fatiga o aceptar la dificultad de su trabajo. Una frase común entre ellos es: “a mí no hay árbol que me pueda.” Profundizando un poco esta idea, además de otras consideraciones surgidas de las conversaciones y reuniones, surge la sospecha de que existe una gran presión en el trabajo, posiblemente porque el número de árboles exigidos a talar, con el fin de cumplir la demanda, puede ser excesivo y ésta podría ser la principal fuente de incomodidad por parte de estos obreros, pero que ellos no se atreven a presentar como tal, haciendo referencia, inicialmente, a otras causas, como se puede ver en la lista descrita anteriormente, minimizando esta inconformidad y relegándola como último punto de su análisis.

El modelo conceptual propuesto, a partir de la definición raíz anterior se indica en la figura 13.4.

Un primer modelo conceptual

Fig. 13.4

Las actividades buscan tener en cuenta las solicitudes del personal de tala. Por esta razón, se hace necesario analizar con detalle la situación de mantenimiento. Por otra parte, no hay duda que cualquier decisión que se tome afectará el aspecto económico de la empresa. Esto justifica la actividad 2. Como el proceso

productivo es fundamental, es necesario conocer con detalle la dinámica futura del bosque. El lector cuidadoso tal vez esté en este momento recordando el ejemplo sobre complejidad dinámica analizado en el numeral 4.2 relacionado con la contratación de profesores. El bosque es este tipo de complejidad¹⁵⁷. Por ello es necesario incluir la actividad 4. Con estos conocimientos es posible entonces realizar una reunión con el personal para discutir las propuestas que puedan surgir: los cambios factibles y deseables a que hace alusión la metodología de Checkland.

Un segundo nivel de resolución nos permite profundizar más en las actividades destacadas por este modelo (ver figura 13.5).

Modelo conceptual de segundo nivel

Fig. 13.5

El subsistema 1 propone la consulta con personal experto en mantenimiento. Después de un estudio concienzudo se llega a la conclusión de que si bien los

157. Reemplazar “árboles” por “profesores” permitirá comprender lo que estamos diciendo.

equipos actuales no son de última generación, son lo suficientemente buenos para llevar a cabo de manera eficiente las labores de la empresa. El mantenimiento de los equipos también ha sido realizado profesionalmente. Todo lo anterior implica que no es necesario, por el momento, hacer ninguna modificación al plan de reemplazo y mantenimiento de equipos de corte y desbroce. El subsistema 2 puede estudiarse, modelando la situación como un sistema determinado. El subsistema 4 considerará una parte del estudio como sistema determinado y otra como sistema animado.

La figura 13.6 es una forma de concebir el sistema como uno determinado.

La situación vista como un sistema determinado

Fig. 13.6

Bajo esta concepción ninguno de los subsistemas tiene capacidad de decisión. Simplemente son partes “obedientes” del sistema total, la administración, la cual la consideramos como parte del ambiente. Como veremos luego, es posible considerar a la administración como el sistema y en este caso tendríamos un sistema animado. El subsistema 2 de la figura 13.5 requiere conocer los siguientes valores: Costos fijos, costo de producción por unidad y precio de venta. Con el departamento de costos se obtuvieron los datos indicados en la tabla de la figura 13.7.

Entidad	Costo fijo/mes	Costo/árbol
Gerente	\$ 3.500.000	
Secretaria	\$ 1.200.000	
Jefe inventarios	\$ 800.000	
Contabilidad	\$ 800.000	
Costos trabajadores tala (6)	\$ 4.200.000	
Costos trabajad. siembra (5)	\$ 2.500.000	
Gastos generales	\$ 5.000.000	
Total	\$ 18.000.000	
Combustible, energía		\$ 150
Mantenimiento equipos		\$ 90
Total		\$ 240
Precio de venta/árbol	\$ 30.000	

Tabla de costos de operación: fijos y variables

Fig. 13.7

La ecuación que permite conocer el punto de equilibrio, es decir, la cantidad de árboles que deben venderse para que la empresa no produzca pérdidas es:

$$Q^* = CF / (Pv - CV) \quad (13-1)$$

en donde Q^* es la cantidad mínima a producir para no generar pérdidas, CF son los costos fijos, Pv es el precio de venta por unidad, y CV son los costos variables. Con los datos anteriores el valor de Q^* es 605 árboles al mes¹⁵⁸.

Para el subsistema 4 de la figura 13.5 utilizaremos la Dinámica de Sistemas. El diagrama se muestra en la figura 13.8.

158. Es fácil deducir esta fórmula. Los ingresos son iguales a $Pv \times Q$. Los gastos son iguales a $CF + CV \times Q$. El valor de Q^* , que hace que los ingresos sean iguales a los gastos totales, debe cumplir la relación $Pv \times Q^* = CF + CV \times Q^*$. Despejando a Q^* obtenemos la ecuación (13-1).

Diagrama de Forrester para el modelo del bosque industrial

Figura 13.8

Las ecuaciones del modelo son:

$\text{ÁRBOLES MADURANDO} = \text{INTEG}(\text{F siembra} - \text{F maduración}, 1500)$.
Units: arboles.

$\text{ÁRBOLES PARA TALAR} = \text{INTEG}(\text{F maduración} - \text{F tala}, 800)$. Units: arboles.

$\text{F maduración} = \text{ÁRBOLES MADURANDO} / \text{T maduración}$. Units: arboles/mes.

$\text{F siembra} = (\text{"Max No. arboles"} - \text{Total de arboles}) / \text{T siembra}$. Units: mes.

$\text{F tala} = 800$. Units: arboles/mes.

$\text{"Max No. arboles"} = 31000$. Units: arboles.

$\text{T maduración} = 36$. Units: mes.

$\text{T siembra} = 1$. Units: mes.

$\text{TIME STEP} = 0.25$. Units: mes.

$\text{Total de arboles} = \text{ÁRBOLES MADURANDO} + \text{ÁRBOLES PARA TALAR}$.
Units: arboles

La dinámica de los primeros 150 meses se muestra en la figura 13.9.

Dinámica del sistema

Figura 13.9

Esta simulación se inició con los datos cuando la empresa empezaba. En los primeros dos años hubo que realizar siembras intensivas. El análisis que se ha hecho se basa en la situación actual, más estable, con un total de 28700 árboles en proceso de maduración y 1500 listos para talar. Esto le da a la empresa un margen para aumentar sus ventas, en caso de que la demanda aumente.

"Los de tala" trabajan 5 días/semana, por lo que deben talar $800/22 = 36.36$ árboles/día. Como la cuadrilla es de 6 trabajadores, cada obrero debe talar 6.06 árboles diarios¹⁵⁹.

La administración tiene ahora conocimientos sobre los siguientes hechos, basados en los constructos mentales generados por los modelos de punto de equilibrio y simulación:

- 1) Debido a que el punto de equilibrio está en 605 árboles, es posible considerar un aumento de personal de tala. Un trabajador adicional cuesta \$500.000 al mes. Sabemos que el promedio de árboles talados por día es de 6.06. Al agregar un trabajador adicional, el promedio diario será de 5.2 árboles. La ganancia producida por los 195 árboles (800-605) permite tomar esta decisión. La empresa acepta la inclusión de un nuevo miembro en el personal de corte. Sin embargo, como se prevé un aumento en las ventas, la

¹⁵⁹. Un mes tiene $365/12 = 30.4$ días. El mes tendrá $30.4/7 = 4.34$ semanas. El mes laboral para estos trabajadores es pues de $5 \times 4.34 = 21.7$ días.

empresa piensa en aceptar como promedio de corte por día, 5.5 árboles. Así se podrán cortar 77 árboles más por mes.

- 2) Si el lote mínimo de producción es de 605 árboles al mes, el beneficio correspondiente a los 800 árboles será de $(800-605) \times (30000-240) = \$5.800.000$.
- 3) Es posible mantener una producción estable, con el fin de satisfacer la demanda (no se requiere de tiempos extras ni de compras a otras empresas para cubrir la demanda).

La administración está ahora en capacidad de entrar a cumplir la actividad 3 (figura 13.5). Sabiendo que la frase “a mí no hay un árbol que me la gane” tiene un profundo significado para los trabajadores de tala, la negociación no hará uso directo de esta idea, pero las propuestas irán dirigidas a respetar al máximo esta metáfora, tan importante para los trabajadores de la sección de corte.

Se revisa el “pliego de peticiones” y se hacen las siguientes observaciones:

- Con respecto al lenguaje “fuerte” queda claro que es fruto de la tensión existente, y no de un deseo de establecer conflictos y reclamos entre las partes. Se espera que, partiendo del interés mostrado por la administración para disminuir las tensiones, el tratamiento entre tala y administración cambiará de tono.
- Respecto al mantenimiento, se presenta el estudio realizado al respecto y “Los de tala” aceptan que, en general, esto es cierto. Tal vez por la tensión surgida y expresada en forma inadecuada verbalmente, se haya exagerado este punto.
- Con respecto a trabajar más horas, la administración no está de acuerdo. El total de 40 horas de trabajo a la semana para este personal se debe a que por tratarse de un trabajo de gran esfuerzo físico, es importante disponer de un tiempo de reposo mayor.
- En relación con el total de árboles exigidos para corte, los dos últimos puntos son equivalentes. La empresa acepta que es posible reducir la exigencia de aproximadamente 6 árboles por día a 5.5. Los trabajadores acuerdan este nuevo estándar de corte.

El modelo de simulación da un número de árboles para talar que es el doble de lo necesario. Es posible ajustar el proceso para sólo 800 árboles. Sin embargo, es ventajoso dejar un margen que permita que cuando se hagan pedidos ma-

yores éstos puedan satisfacerse. Pero además, la empresa debe pensar a futuro y considerar que su mercado puede ampliarse. De todas formas, el modelo de simulación permite hacer los ajustes del caso.

Es importante destacar que sin un estudio previo, en este caso los análisis de costo y de la dinámica del bosque, no hubiera sido posible llegar a conclusiones de manera rápida y eficiente desde un punto de vista sistémico. Tal vez parezca una situación trivial que se ha complicado únicamente con la finalidad de destacar la importancia de este tipo de enfoque. Podríamos argumentar que es un caso típico de análisis que se hace continuamente en cualquier empresa. Sin embargo, creemos que algo no marcha bien en esos “típicos análisis cotidianos” porque los casos de la vida real nos muestran situaciones que, aparentemente resueltas, no satisfacen a las partes y cuyo resultado real es reforzar la sensación de inconformidad.

13.2 Resumen

El capítulo se inicia con una comparación entre las características fundamentales de los sistemas naturales y los sociales. Este cuadro deja claro el cuidado que debe tenerse cuando tratamos de copiar modelos, técnicas y metodologías de las ciencias clásicas, a situaciones de las ciencias humanas. O dicho de otra manera, copiar modelos reduccionistas a situaciones que requieren un enfoque sistémico.

El ejemplo expuesto tiene como finalidad demostrar que tanto el enfoque clásico de la ciencia y las metodologías y técnicas de ella derivadas, como el enfoque de sistemas, no compiten, no se reemplazan ni se anulan entre sí, sino que se complementan.

Hemos querido aquí hacer evidentes varios de los temas tratados a lo largo del texto. La metodología de Checkland se utiliza como abrebocas para el estudio de la situación problemática. De este modo, se proponen opciones para utilizar métodos analíticos (en este caso la metodología de Forrester y el análisis de costos) y se discute cómo una misma situación puede ser vista desde la perspectiva de diferentes “sistemas” (una de las clasificaciones de Ackoff), para, finalmente, resolver una situación compleja.

CAPÍTULO 14

CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SISTEMAS

14.0 ¿Son necesarias las críticas?

En el esquema que hemos trazado, que cubre desde los conceptos básicos de la ciencia hasta la aplicación práctica del enfoque de sistemas, hemos encontrado algunas dificultades que se han considerado someramente. Este trabajo quedaría incompleto si no incluyera de alguna manera un resumen de las principales críticas hechas al movimiento sistémico.

Hay que admitir que no es fácil, para alguien que cree en esta manera de ver el mundo, hacer de abogado del diablo, sobre todo cuando existe la posibilidad de que el resultado final no sea precisamente una canonización. Pero, desde una perspectiva de honestidad intelectual, es una tarea que debe estar por encima de tales sentimientos y temores.

14.1 Las críticas de D.C. Phillips

D.C. Phillips (1971) hace una serie de reparos muy interesantes a la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy y que son válidas, en general, para el enfoque de sistemas. Centra sus juicios en cuatro aspectos primordiales:

- Crítica a la filosofía de sistemas.
- Crítica a la imprecisión del concepto de sistema.
- Crítica a la debilidad de los ataques al reduccionismo y al mecanicismo.
- Crítica al carácter dudosamente científico de la teoría.

Veamos de qué trata cada una de ellas, siguiendo de cerca a este autor.

14.1.1 Críticas a la filosofía de sistemas

Estas críticas incluyen aspectos relacionados con la identificación de los elementos o partes de los sistemas, la jerarquización de los mismos, la propiedad emergente y las relaciones entre el todo y las partes.

14.1.1.1 Todos y partes

Crítica. Cuando los teóricos de los sistemas aseguran que *el todo determina la naturaleza de las partes*, se presenta la siguiente contradicción. Si la realidad se considera como un sistema cuyas partes están interrelacionadas orgánica o internamente, ésta no podrá ser subdividida en partes. En términos de la teoría de las relaciones de Hegel, podríamos decir que cuando *A* entra en relación con *B* y *C*, gana cierta propiedad *P* como resultado de las interrelaciones. Sin las interrelaciones, sin *P*, *A* no es *A* y podría incluso ser *no-A*. Un elemento podría ser pues, a su vez, su contrario. Por ejemplo, una persona se comporta normalmente como parte de una organización, trabajando diariamente en una oficina común. Pero al salir de allí, se le desarrollan temores debido a que sufre cierto tipo de fobia a la soledad (cremiofobia). No podríamos asegurar, entonces, que esta persona está determinada por su “todo”: la oficina donde trabaja.

Defensa. Usando el concepto de “naturaleza” de una entidad, este argumento tiene aparentemente fuerza, según Phillips. Pero a la luz de la terminología actual, pierde poder. Aquí el énfasis en la naturaleza de las entidades es reemplazado por el énfasis en las *características definidoras y acompañantes*. Toda entidad tiene un enorme número de características. Aquellas sin las cuales la entidad no pudiera designarse como tal, son las definidoras; las otras son las acompañantes: su presencia o ausencia no establece diferencia para el uso del término. Entonces, al relacionarse *A* con *B* o *C* puede adquirir características, no necesariamente definidoras, y por lo tanto seguir siendo *A*. En nuestro ejemplo, la cremiofobia no “define” a nuestro sujeto, aunque es una característica que se hace presente bajo ciertas circunstancias. No podemos decir que, con ella o sin ella, él deja de ser quien es.

También hemos dicho que la definición de partes (subsistemas) es una necesidad intelectual. Que nuestro cerebro no puede procesar el todo y necesita concebir subdivisiones para comprender la complejidad. Pero es claro que tales subdivisiones son “constructos mentales”, no realidades, que nos ayudan

a modelar lo que de otra manera no podríamos entender. Con Simon aprendimos que es posible casi-descomponer un sistema, pero que debemos siempre estar atentos que en este proceso se eliminen interrelaciones que, de alguna manera, afecten a los sistemas separados (descompuestos).

14.1.1.2 Jerarquización

Crítica. Respecto a la jerarquización de los sistemas, como lo indicamos en su momento, ella presenta serias dificultades para explicar la forma como podemos adquirir cierto conocimiento de las cosas. Si se sigue este principio, nos vemos abocados a la paradoja de no poder conocer ninguna entidad. Así, para conocer A es necesario conocer todas las relaciones de A: conocer el todo antes que A. Como diría B. Russell: “si todo el conocimiento fuera el conocimiento del universo como un todo, no habría conocimiento”.

Defensa. Anteriormente ya habíamos tratado el tema ayudándonos del concepto de “casi-descomponibilidad sistémica”: no es necesario conocer el todo (el universo) para conocer algún subsistema. Pero queda pendiente el asunto relacionado con los sistemas extremos: el gran elemento que los contiene a todos y no es contenido por ninguno, por lo que no es un sistema, y el elemento último, que no contiene ninguno y por lo tanto no es un sistema: en ambos casos estos elementos rompen la jerarquía. Ackoff (2002, p. 20) dice al respecto:

Si el comportamiento de un sistema debe explicarse con referencia al sistema que lo contiene (suprasistema) ¿cómo debe explicarse el comportamiento del suprasistema? La respuesta es obvia: con referencia a un sistema más inclusivo, uno que contenga al suprasistema. Surge entonces la pregunta fundamental: ¿tiene fin este proceso de expansión? Recuérdese que cuando se planteó la pregunta correspondiente a la Era de la máquina –¿tiene fin el proceso de reducción?–, la respuesta estuvo dictada por la creencia de que, al menos en principio, era posible la comprensión completa de universo. En la primera parte del siglo XX, sin embargo, esta creencia fue destrozada por dilemas como el que formuló Heisemberg. Como resultado, hemos llegado a creer que la comprensión completa de cualquier objeto, dejando de lado la de todos los objetos, es un *ideal* al que uno puede aproximarse continuamente pero que *nunca puede ser alcanzado*. Por lo tanto, no hay ninguna necesidad de suponer la existencia de un todo último que si es entendido produciría la respuesta última.

14.1.1.3 Emergencia sistémica

Crítica. En la teoría de sistemas el aforismo: *el todo es mayor que la suma de sus partes*, es un resumen de lo que la teoría sostiene. En esencia estamos hablando de la propiedad de la emergencia de los sistemas. Cuando discutimos el tema, observábamos cómo los sistemas presentan la interesante característica de tener comportamientos que ninguna de sus partes posee. Phillips anota que en esta afirmación, el concepto de suma debe aclararse; es necesario especificar en el aforismo el tipo de operación a la que nos estamos refiriendo. En la matemática existe la suma aritmética, algebraica, vectorial. Sería posible, entonces y por lo menos en teoría, definir “sumas” que reflejen la característica de la emergencia. Pero ésta opción no resolvería el problema ya que las dificultades que se presentan son de tipo lógico: al insistir que debemos definir primero el todo para luego definir sus partes, forzosamente debemos aceptar que el todo se autodetermina o autodefine. Como las partes son partes del todo, el todo se determina a sí mismo y ellas no intervienen en la explicación.

La crítica en este aspecto continúa afirmando que la emergencia viola un principio lógico en el cual descansa gran parte del pensamiento científico: el silogismo; recordemos que éste nos dice que una conclusión no puede tener elementos que no estén contenidos en sus premisas. Así, en el caso de la formación del agua, compuesta por hidrógeno y oxígeno, el ser un líquido no puede ser deducido de las propiedades que tienen, de manera aislada, los dos gases que la componen. Conclusión: el agua tiene por lo menos una propiedad que sus componentes no poseen. Si la ciencia tradicional no puede dar una explicación, tampoco la está ofreciendo la teoría de sistemas. Y es muy probable que en un futuro se puedan encontrar propiedades aún desconocidas de la materia que permitan deducir cómo un líquido se puede formar a partir de dos gases.

Defensa. La primera parte de la crítica ya fue analizada en el numeral 4.1.7. Por otra parte, es evidente que la emergencia viola el razonamiento deductivo basado en el silogismo, dentro de una lógica bivalente. Pero hemos dado interesantes ejemplos de “violación de principios” aparentemente intocables. Así, la “ley del tercero excluido”, que no permite la posibilidad de que un elemento forme parte de un conjunto y a su vez de su complemento, no es válida para el caso de las lógicas basadas en conjuntos difusos. Tampoco ha sido evidente que cuando los elementos de un sistema interactúan en forma no lineal, aparezcan patrones de conducta sorprendentes: a partir del desorden, por ejemplo,

podemos obtener sistemas altamente organizados. Tampoco había sido puesto en duda que, para un sistema de ecuaciones diferenciales, si las condiciones iniciales eran dadas y por alguna razón se hacía una pequeña modificación en ellas, el resultado debía ser igual o muy cercano al basado en las condiciones no modificadas. Difícil concebir cómo la luz pueda ser, a la vez, partícula y onda, cuando son dos propiedades antagónicas. El tipo de crítica de Phillips es válida también para la ciencia en general.

14.1.2 Críticas al concepto de sistema

Crítica. Al respecto, Phillips destaca cómo la definición de lo que debe entenderse por “sistema,” aunque es planteada sistemáticamente por los tratadistas del tema, no ha sufrido ningún avance notable y sigue pecando de los mismos defectos. Así, cita a Haldane, quien en 1884 escribía (ver Schöderbeck, 1971, p. 59):

Estas partes [del organismo] permanecen una con otra y con el ambiente, no en una relación de causa y efecto, sino en una de reciprocidad. Las partes de un organismo y su ambiente forman pues, un sistema, y cualquiera de sus partes constantemente actúa sobre el resto, pero sólo lo hace “*qua*” parte del sistema, en la medida en que él, al mismo tiempo, actúa sobre ella.

La lectura de cualquier autor moderno sobre Sistemas nos mostrará que no ha habido cambio sustancial en la concepción de Haldane.

Continúa la crítica destacando que las definiciones de sistema no aclaran cómo se puede delimitar el sistema que se desea estudiar. En efecto, tal delimitación es fundamental, pues de otra manera tendríamos que estudiar al universo entero cada vez que quisiéramos estudiar un sistema en particular, ya que, de alguna manera, todo está relacionado con todo. Es una crítica que tiene el mismo contexto que la crítica a la jerarquización a la cual ya hemos hecho referencia.

Algunos autores (Hall y Fagen; Beishon etc) proponen que quien estudie un problema, seleccione aquellas entidades que son relevantes al mismo y llamen a tales entidades “el sistema”. Esto parece ser una situación desesperada y ampliamente violatoria de los principios de sistemas. Para empezar, el teórico sólo podrá considerar entidades relevantes si tiene algunos principios de selección

o criterios específicos y esto sólo es posible si ya se ha hecho considerable investigación para el problema particular que él considera: “la investigación deberá encontrarse en niveles tan adelantados que ya sea posible decir que las entidades *a*, *b* y *c* son importantes, pero que *d*, *e* y *f* no lo son”, afirma Phillips. Además, este conocimiento debe haber sido alcanzado sin el uso de métodos de sistemas, pues lo que se busca es definir el sistema al cual se le va a aplicar la teoría de sistemas. Parece ser que el criticado reduccionismo es el método a usar para poder llegar a un nivel de investigación suficiente que permita definir el sistema.

Por otra parte, con seleccionar (definir) el sistema, no terminan sus problemas. Debe ahora demostrar que al aislar este sistema de las otras partes con las cuales está normalmente interrelacionado, no ha introducido cambios en él. Y caemos de nuevo en el asunto de *A* y *no-A* discutido anteriormente.

Defensa. La crítica a la definición del concepto de sistema, tal y como se indicó anteriormente, es una espada de Damocles que pende continuamente sobre los especialistas del tema. Y si bien en la práctica ha sido posible evitar las dificultades que el término encierra, especialmente mediante la idea de casi-descomponibilidad de los sistemas, en los aspectos filosóficos y teóricos tal dificultad está siempre latente. Queda, sin embargo, la posibilidad presentada en este texto, de conceptualizar el sistema como una noción no definida, como un constructo mental, una concepción abstracta de un fenómeno real. Dijimos en su momento que para el caso de personas con conocimientos similares respecto a un fenómeno y que lo puedan definir de manera aproximadamente igual, dicha definición, para ellas, podría ser el sistema. Por otra parte se ha propuesto una definición de carácter operativo, una línea de definición muy usada en la ciencia clásica. En lo que respecta al mundo “blando” diríamos que el sistema no existe y que lo que se logra, a través de las diversas percepciones, es un “constructo mental”. En tal caso caemos en el mundo abstracto, tal y como ocurre con la matemática, y allí sí es posible recurrir a ideas intuitivas, no definibles como sucede con los conceptos de punto, línea, conjunto... Ya Melanie Mitchel nos ilustró cómo esta situación no es tan extraña en la ciencia en general¹⁶⁰.

160. Cfr. numeral 3.4 y 7.0.

14.1.3 Debilidad de los ataques al reduccionismo

Crítica. Es claro que una de las diferencias fundamentales entre el enfoque analítico y el sistémico es la no reducción a las partes para explicar las propiedades del todo. Esto es no aceptar la propuesta de Descartes para comprender la complejidad. En el fondo, es retomar el problema de la emergencia sistémica.

Defensa. En parte se remite a lo discutido con respecto a la emergencia sistémica considerada más arriba. Sin embargo, en honor a la honestidad académica, debemos que sí existe una especie de “reduccionismo sistémico”. Descartes propuso descomponer un problema complejo en partes, arreglándolas en un orden lógico. Luego se resolvería cada parte para resolver el todo. En la T.G.S. se hace lo mismo (subdivisión en subsistemas). La diferencia es la siguiente: la influencia de Descartes llevó a que las subdivisiones se hicieran hasta llegar a los elementos más simples, irreducibles: átomos, moléculas, células, individuos... Pero esto no es necesario: podemos reducir el todo a características más manejables y coherentes con la realidad: los subsistemas (Capra & Luisi 2014, p.24).

Sería interesante, como ilustración, considerar la situación en que se encuentra la biología molecular, un extraordinario ejemplo de reduccionismo y mecanicismo moderno frente a la explicación de cómo a partir de los genes, asuntos tales como la formación de la personalidad y el surgimiento de la ética, pueden ser explicados (deducidos). Recordamos al lector el numeral 4.1.7.

En la importante obra de Changeux-Ricoeur (2001, p. 313), al final del libro, y luego de debatir ampliamente el asunto neuronas-ética, nuestros dos investigadores comentan, en el primer párrafo de su extraordinaria fuga:

Un diálogo sobre la "voz humana" –esa música de órgano que imita el timbre de la voz, retiene la melodía del canto y hace soñar en conjunto, al margen de toda palabra– jamás agotará el debate de ideas sobre las relaciones de la ciencia y la ética. No puede cerrarse sobre sí mismo. Si ofrece qué pensar, habrá alcanzado su meta. Al lado de una historia del pensamiento filosófico excepcionalmente rica, al lado de testimonios múltiples de la experiencia de los hombres, de su sabiduría, la reflexión sobre las neurociencias sigue siendo demasiado fragmentaria. Aunque sean imperfectas, las tentativas de síntesis de esos saberes en constante evolución son escasas. Si no hacen más que contribuir a suscitar una mayor reflexión en

el contexto de un intercambio sincero entre ciencias biológicas y ciencias del hombre y de la sociedad, ese diálogo habrá cumplido su función.

De nuevo, esa necesidad imperiosa de reunir ciencia y humanismo.

14.1.4 Crítica al carácter científico de la Teoría de Sistemas

Crítica. Nos referimos aquí, como teoría de sistemas, a todas aquellas teorías que se basan en un enfoque globalista (sistémico) para desarrollar sus metodologías y técnicas. Un caso particular es la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy.

Hemos dicho que la capacidad de predicción es una característica fundamental de cualquier teoría científica. Toda teoría que se precie de científica debe, pues, predecir eventos que sean observables posteriormente. A este respecto, Popper (1991, p. 59) hace la siguiente anotación al referirse a las doctrinas de Marx, Freud y Adler:

Hallé que aquellos de mis amigos que eran admiradores de Marx. Freud y Adler estaban impresionados por una serie de puntos comunes a las tres teorías, en especial su aparente poder explicativo. Estas teorías parecían poder explicar prácticamente todo lo que sucedía dentro de los campos a los que se referían. El estudio de cualquiera de ellas parecía tener el efecto de una conversión o revelación intelectuales, que abría los ojos a una nueva verdad oculta para los no iniciados. Una vez abiertos los ojos de este modo, se veían ejemplos confirmatorios en todas partes: el mundo estaba lleno de verificaciones de la teoría. Todo lo que ocurría la confirmaba. Así, su verdad parecía manifiesta y los incrédulos eran, sin duda, personas que no querían ver la verdad manifiesta, que se negaban a verla, ya porque estaba contra sus intereses de clase, ya a causa de sus represiones aún "no analizadas" y que exigían a gritos un tratamiento.

De la misma manera que Popper, Phillips concluye que se puede asegurar que la teoría de sistemas no ha hecho ninguna predicción notable respecto a los sistemas complejos que ella explica o maneja. De hecho, es una teoría que no se compromete.

Defensa. Debemos reconocer que en la fecha en la cual este autor escribió sus críticas, el pensamiento sistémico estaba atravesando una gran crisis. Los modelos formales eran eminentemente teóricos y las tendencias se centraban en las metodologías. Pero los desarrollos a partir de 1980, tanto teóricos como prácticos, han desestimado esta posición.

Para comenzar, observamos cómo es posible establecer marcos teóricos que permiten explicar y deducir leyes referentes a los sistemas, en otras palabras, marcos teóricos que cumplen los requisitos del formalismo en la ciencia.

La Teoría de la Complejidad está aportando explicaciones (y predicciones) de fenómenos muy complejos mediante el uso de la matemática. El argumento ya no tiene validez, a la luz de los desarrollos modernos.

En cuanto a la predicción, para el caso de los sistemas de la actividad humana, es necesario aclarar qué se entendería por predicción. Si se trata de anticipar con exactitud los comportamientos de un sistema, ya esto ni siquiera es posible en muchos procesos de la naturaleza. La teoría del caos se ha encargado de ilustrar de muchísimas maneras esta imposibilidad. Pero la descripción y explicación de comportamientos generales sí se ha logrado, y esto a través del establecimiento de principios y leyes, que es una característica fundamental del conocimiento científico. De hecho, la Teoría General de Sistemas ha ejercido una importante influencia en la economía, la psicología y la sociología. Es interesante recordar a J. Diamond, numeral 1.1.3.3 y las "ciencias históricas".

14.2 Las críticas de Gall

En 1975 John Gall (1978) publicó un libro que llamó: "Systemantics" (de Systems: sistema y Antics: travesuras). Aunque el libro fue escrito en un tono ampliamente humorístico, no por ello deja de tener un profundo contenido en sus críticas.

El presente trabajo ha sido desarrollado en un esquema eminentemente académico. Por esto, parecería poco pertinente referenciar algunos de los conceptos que Gall presenta en su interesante obra a la manera como él lo hace. Espero que el lector sepa aquilatar el verdadero contexto que se esconde detrás de sus finas y mordaces críticas. La inclusión, muy resumida, de algunas partes de su libro, obedece a dos razones: primero, nos muestra cómo en temas de mucha dificultad, abandonar el estilo académico y recurrir al fino humor permite

tocar puntos referentes a la administración y los sistemas que de otra manera sería difícil considerar (otro excelente ejemplo es el *Principio de Peter* (1970)); en segundo lugar, a través de las críticas del profesor Gall es posible adquirir un conocimiento de los sistemas desde una perspectiva práctica, así como hacer un buen repaso de una serie importante de conceptos de sistemas. Las posibles explicaciones u observaciones se harán sobre la lectura utilizando el recurso de pie de página.

“Alea Jacta est”.

14.2.1 La sistemática y sus teoremas sistémicos

Escenario básico de la teoría:

Los sistemas en general trabajan poco o no trabajan.

Una forma alternativa:

Nada complicado funciona.

Esta es la propuesta fundamental de la teoría. En lo que sigue se darán ejemplos concretos al respecto.

El teorema fundamental¹⁶¹:

Nuevos sistemas generan nuevos problemas.

Corolario (la navaja de Occam):

Los sistemas no deben multiplicarse innecesariamente.

Si un sistema es creado para lograr un objetivo, el sistema, tarde que temprano elabora sus propios objetivos. Sin importar el objetivo, el sistema “empieza inmediatamente a manifestar un comportamiento sistémico regido por leyes

161. Ya lo dijimos: los problemas de hoy derivan de las “soluciones” de ayer. En este punto se destaca cómo, en muchas ocasiones, es el sistema el responsable de sus propias decisiones.

que gobiernan la operación de todo el sistema”. Donde sólo había un problema, ahora habrá una infinidad de problemas asociados con la sola presencia del nuevo sistema¹⁶².

Ejemplos: Gall destaca el bienestar de las naciones, la recolección de basuras. Invitamos al lector a que desarrolle estos dos temas a la luz del teorema fundamental.

Ley del crecimiento:

*Los sistemas tienden a crecer, y a medida que crecen,
se inmiscuyen.*

Forma alternativa (teorema de la explosión de la cosmología sistémica):

Los sistemas tienden a expandirse y llenar el universo conocido.

Ejemplo: Gall comenta el caso de los productos “Hágalo Ud. mismo”. Después de luchar infructuosamente tratando de entender y seguir los instructivos, el cliente debe buscar lo que el sistema trataba de evitar para “ahorrarle trabajo y gastos”: un experto. Después de muchas horas y desesperación, el frustrado comprador se da cuenta que los medios de producción en masa fueron creados con el fin primordial de hacer las cosas mejores, más rápida y económicamente”.

Ejemplo: Los sistemas de gobierno, creados para la protección de sus ciudadanos, pueden convertirse en su peor opresor.

Principio de incertidumbre generalizado:

Los sistemas complicados producen resultados inesperados.

Formulación alternativa:

*El comportamiento total de los sistemas grandes no
puede ser predicho¹⁶³.*

162. Conocer los verdaderos objetivos (propósitos) del sistema ¡he ahí la gran dificultad! Los sistemas de la actividad humana están formados por personas con capacidad de decisión y de percepciones diferentes ante los mismos hechos.

163. En una de las definiciones de sistema complejo indicadas en este texto: los sistemas son complejos (dinámicamente) si no es posible predecir su comportamiento a corto o mediano plazo (Cfr. numeral 4.2) anticipábamos este principio. Además,

Corolario:

Un sistema de gran escala, obtenido de la expansión de las dimensiones de uno pequeño, no se comporta como el sistema pequeño.

Ejemplo: Gall comenta: La represa de Asuán, construida con enormes gastos con el fin de mejorar las parcelas de los campesinos Egipcios, ha causado que los sedimentos fertilizantes del Nilo se depositen en el lago Nasser de donde es irrecuperable. Los campos Egipcios deben ahora ser fertilizados artificialmente. Se han construido gigantescas plantas de fertilizantes, para llenar las nuevas necesidades. Las plantas requieren enormes cantidades de electricidad. La represa debe operar a plena capacidad para satisfacer las demandas cada vez mayores de electricidad, creadas por la construcción de la misma.

Ejemplo: (Diseño máximo: “Climax Design”): El edificio más grande del mundo, el hangar para la preparación de vehículos espaciales en cabo Kennedy genera su propio clima incluyendo nubes y lluvias. Fue diseñado para proteger los cohetes espaciales de las influencias del clima y, paradójicamente, se ve sometido a un microclima desfavorable que se genera en el mismo hangar.

Principio de Le Chatelier:

Los sistemas complejos tienden a oponerse a su propia función (contraatacan).

Ejemplo: Gall, acertadamente da el siguiente ejemplo. Usted realiza una investigación por su cuenta y propio interés (que puede ser oculto y no manifiesto). El sistema administrativo decide que la investigación debe administrarse y crea un departamento para tal fin. Usted recibe un oficio en el cual le solicitan sus “objetivos” y “metas” respecto a la investigación con lo cual se ve forzado a inventarlos ya que un simple interés no es suficiente y es necesario reforzar sus argumentos “científicamente”. El paso siguiente es claro: ahora el sistema le exigirá que cumpla con los objetivos descritos, lo cual no podrá evitar ya que fue usted mismo quién los propuso. Su investigación original se ha perdido y difícilmente podrá realizar entonces una verdadera investigación. El sistema,

la crítica es fruto de la emergencia sistémica: sistemas interrelacionados generan nuevos sistemas con propiedades que los sistemas originales no poseen. Aplicar aquí una lógica reduccionista es un error, especialmente en un proceso de predicción de comportamientos.

diseñado para aumentar la eficiencia en la investigación, contraatacó dando como resultado ineficiencia en lugar de eficiencia¹⁶⁴.

Falsedad del funcionario:

*La gente en los sistemas no hace lo que el sistema
dice que está haciendo*¹⁶⁵.

Ejemplos: De nuevo Gall: un rey se supone que gobierna su país. De hecho gasta mucho de su tiempo y energía (y del tesoro de su reino) luchando contra los invasores.

En los países democráticos, un presidente recién elegido puede encontrar oportuno empezar a planear su reelección inmediatamente.

La falacia operacional:

El sistema mismo no hace lo que dice que está haciendo.

Ejemplo: Las grandes empresas productoras nos convencen de que nos ofrecen lo que necesitamos. La verdad es que nos inducen a comprar lo que ellas hacen. En la visión moderna de la producción, la idea es imaginarse lo que nos gustaría tener, y entonces al sacar el producto al mercado, este se hace absolutamente necesario. Apple es un buen ejemplo.

Ley Fundamental del trabajo administrativo:

*Las cosas son aquellas que son reportadas como tales.
El mundo real es lo que reporta el sistema.*

164. Es interesante observar como en muchos sistemas, especialmente de carácter oficial, la estrechez de visión de los funcionarios públicos y la obligación a que se ven sometidos a cumplir estrictamente los reglamentos de su oficio, impiden la posibilidad de aplicar criterios diferentes ante las mismas circunstancias. Un sistema, que realmente sea un sistema, se debilita, en sus funciones básicas, con estas visiones reduccionistas. Recordemos lo que nos dice la Teoría de la Complejidad al respecto.

165. Ya lo dijimos, conocer los verdaderos objetivos o propósitos de un sistema ¡no es asunto fácil!

Corolario:

Para aquellos que están dentro del sistema, la realidad externa tiende a palidecer y desaparecer.

Una forma alternativa de decir lo anterior es: *si no es oficial, no ha ocurrido.*

Ejemplo: La frase del derecho penal que reza: “el delito no existe, es creado por la ley”. En otras palabras, sólo es delito aquello que como tal es contemplado en el código o la ley penal.

Teorema (¿Ley gravitacional de los sistemas?)

Los sistemas atraen gente de sistemas.

Corolario: para cada sistema humano, hay un tipo de persona adaptada para desarrollarlo a expensas de él o dentro de él.

Nota: es inútil cualquier esfuerzo por eliminar a las personas parásitas del sistema. Esto llevaría a formar comités de evaluación, comités de protección etc., lo que generaría nuevos empleos en qué ocupar a estas personas.

Teorema:

Entre más grande es el sistema, más estrecha y especializada es la interfaz con los individuos.

Ejemplo: En los grandes sistemas, las relaciones no son con los individuos sino con su número de cédula, su tarjeta de crédito o algún otro fantasma de papel. Es sorprendente cuando una persona llega a una unidad de urgencia. Si no tiene la cédula, no puede ser atendido. La cédula es la persona.

Teorema:

*Un sistema complejo no puede ser “hecho” para trabajar.
Él simplemente trabaja o no¹⁶⁶.*

Corolario (Ansiedad del administrador):

166. De alguna manera se destaca el error que se comete al “diseñar” un sistema para que ejerza ciertas “funciones”. La metodología de Checkland nos advierte claramente del error que se comete con esta actitud.

Presionar al sistema no sirve. Esto empeora las cosas.

Ejemplos: Se diseña una escuela para educar a los niños de un barrio que presentan comportamientos difíciles. Pero allí se refuerzan sus actitudes agresivas. ¿Qué tal las penitenciarías como corrección de la conducta de los malhechores?

Teorema:

Algunos sistemas actualmente trabajan.

Corolario:

Si un sistema funciona, déjelo tranquilo.

Teorema:

Un sistema complejo que funciona, invariablemente se encuentra que ha evolucionado de un sistema simple que funcionaba¹⁶⁷.

Esto nos lleva a la siguiente proposición:

Un sistema complejo hecho desde el principio nunca trabaja y no puede ser arreglado para que trabaje. Es necesario empezar de nuevo con un sistema sencillo que funcione.

Esto explica la existencia de una enorme cantidad de organizaciones Estatales que son inoperantes.

Teorema de la indeterminación funcional:

En un sistema complejo, el mal funcionamiento e incluso el no funcionamiento total, puede no ser detectable por largos períodos de tiempo.

Ejemplo: Es sorprendente cómo grandes corporaciones, que invierten una enorme cantidad de dinero en sistemas de control, colapsan repentinamente ya que, hasta el momento, nadie se había dado cuenta de su situación económica real.

Gall dice: parece que el problema es evaluar el "éxito" o "fracaso" de los sistemas grandes ya que no se dispone de criterios apropiados. ¿Acaso el sistema feudal

167. Tal como Simon lo dijo: los sistemas complejos estables, surgen de la jerarquización de formas estables intermedias.

fue un éxito o un fracaso? (Por un lado, salvó la civilización Occidental. Por otro, creó los nacionalismos que tanto daño hacen a la humanidad).

La hipótesis Kantiana:

Los sistemas grandes, complejos, están por encima de la capacidad humana para evaluarlos.

Ley de Newton de la inercia sistémica¹⁶⁸ :

Un sistema que tiene un cierto interés, continuará operando de la misma manera, independientemente de las condiciones cambiantes o de las necesidades cambiantes.

Ejemplo: Es común observar como el frenesí de construcción de viviendas, cuando hay demanda de las mismas, continúa mucho tiempo después de que ya se ha saturado la demanda.

Teorema:

Los sistemas desarrollan metas propias tan pronto como son formados. Las metas intra sistémicas son prioritarias.

Ejemplo: Gall resalta: las Naciones Unidas suspendieron recientemente, durante todo un día, sus esfuerzos para analizar las drogas, la tensión mundial, el petróleo, para debatir cuándo un empleado de la ONU podía viajar en primera clase en los aviones.

De lo anterior podemos concluir que el tratamiento de los sistemas en el mundo actual no tiene prácticamente nada de sistémico. Se siguen usando procedimientos lineales, en donde no es posible hacerlo, pero a menudo evocan el uso de una "visión sistémica" que, evidentemente, no existe.

168. Recordemos el efecto de las demoras como parte de la dificultad para predecir el comportamiento de sistemas complejos.

14.3 Resumen

Tal y como se afirma en este capítulo, es necesario hacer un alto y sopesar la opinión de aquellos para quienes la Teoría de Sistemas no es una herramienta adecuada. Las críticas deben ayudarnos a decidir si lo que creemos o conocemos sobre algo, debe modificarse, abandonarse o reforzarse.

Phillips centra sus críticas en el concepto de sistema, por ser impreciso; también se centra en los ataques que se han hecho al reduccionismo y al mecanicismo arguyendo que si bien no explican la emergencia sistémica, tampoco lo ha hecho la teoría de los sistemas. Sostiene además que la T.G.S. no es una teoría científica. Cada una de estos aspectos ha sido considerado con cierto detalle por nosotros, y como un balance general podemos decir que, aceptando las debilidades que en la ciencia se presentan comúnmente, la T.G.S. y la T.C. resisten un análisis minucioso de sus principios, metodologías y técnicas. No debemos olvidar que las fortalezas del enfoque tradicional se convierten en serias debilidades cuando de sistemas humanos se trata.

Por su parte Gall, utilizando en su lenguaje un fino humor, hace acertadas críticas a los sistemas. Sin embargo, tales críticas son, en efecto, las debilidades que se encuentran en muchos “sistemas” ¡que no son tales! El uso inadecuado del término permite que conjuntos que no están interrelacionados según un propósito coherente, que se aíslan del ambiente, sean llamados sistemas.

14.4 “Coda”

Hemos terminado el objetivo de este trabajo. Es evidente que han quedado conceptos sistémicos que ni siquiera han sido indicados. Pero la intención no era, tal y como anotábamos en la introducción, hacer una presentación exhaustiva de esta teoría, sino, más bien, tratar de resumir sus fundamentos y su aplicación en el mundo real, como una nueva alternativa complementaria del conocimiento científico tradicional.

Para las personas formadas en campos tradicionales de la ciencia analítica estas ideas pueden no ser muy convincentes ya que, sin duda, su manera tradicional de pensar y operar ha sido exitosa. Pero aún bajo esta perspectiva, vale la pena tener en cuenta los fundamentos que el enfoque de sistemas resalta, para

comprender el mundo complejo que nos rodea. Como bien dice Churchman,
el enfoque de sistemas no es una mala idea.

APÉNDICES

APÉNDICE CAPÍTULO 1

A.1.1 Empirismo y racionalismo

Existen dos perspectivas teóricas sobre el problema de cómo conocemos el mundo: el empirismo y el racionalismo (tomado de Wulff *et al.* 2002, p. 41-44). Ellas se encuentran ligadas a dos niveles de discusión filosófica: el nivel ontológico, que se refiere a la existencia verdadera o naturaleza verdadera de las cosas y el epistemológico, que hace referencia a lo que podemos conocer del mundo. En términos sencillos, el conocimiento es derivado de los sentidos o es derivado de la razón.

Cuando decimos que las cosas existen –por ejemplo, un árbol– independientemente de que alguien las observe, estamos haciendo un juicio ontológico. Pero si decimos que no podemos asegurar que el árbol existe independientemente del sujeto que lo observa y que la observación es la única fuente de conocimiento, entonces estamos haciendo un juicio epistemológico.

Ahora bien, si a nivel ontológico afirmo que las cosas existen independientemente de que ellas sean o no observadas, estoy tomando una posición realista. Pero si afirmo que mi conocimiento de ellas depende de la experiencia que me ofrece mis sentidos, entonces estoy siendo antirrealista porque ¿quién puede probar, demostrar que el árbol existe cuando no lo veo, cuando no es observado?

El empirismo se define como aquella perspectiva que sostiene que sólo podemos conocer lo que puede ser observado. Dicho de otro modo, la única fuente de conocimiento es la experiencia, aquello que procede de nuestros sentidos. No podemos saber nada acerca de cosas que no hayamos observado. En este sentido, el empirista es ontológicamente antirrealista.

El racionalismo es la perspectiva que sostiene que la única fuente de conocimiento es nuestra razón, es decir, que sólo ella es confiable respecto al conocimiento de las cosas. Dicho de otro modo, desde la perspectiva epistemológica, quien sostenga que la razón es la verdadera fuente de conocimiento es racionalista.

Respecto a cuál es el nivel de discusión prioritario tenemos otra diferencia. El realista sostiene que las cuestiones ontológicas “tienen prioridad sobre las

epistemológicas”. El empirista, por su parte, sostiene que son prioritarias las cuestiones epistemológicas porque “antes de decidir qué existe tenemos que ponernos de acuerdo sobre qué podemos saber y qué no”, es decir, qué estamos en capacidad o no de conocer.

La tabla de la figura A.1.1 resume lo dicho.

Nivel de discusión	Posturas filosóficas	
Ontológico	Realismo	Antirrealismo
Epistemológico	racionalismo	Empirismo

Formas de conocer el mundo

Fig. A.1.1

Repitiendo. Una persona que, ontológicamente sea realista, epistemológicamente es racionalista. Una antirrealista, ontológicamente, será empirista, epistemológicamente.

La ciencia moderna dio más importancia a los asuntos epistemológicos que a los ontológicos y metafísicos cimentándose, en consecuencia, en el empirismo. Así, la observación metódica de los fenómenos, la cual requiere procedimientos definidos, por ejemplo, la medición y el control, fue la condición sin la cual ellos no podían ser estudiados.

Sin embargo, la discusión entre empiristas y racionalistas –que aún no termina– fue zanjada, al menos en parte, por Immanuel Kant quien puede ser considerado como el fundador de la epistemología moderna. Algunas ideas al respecto ya se discutieron en el capítulo 1, y algunas otras se considerarán en el literal siguiente.

Veamos el siguiente ejemplo para ilustrar la posición empirista en la ciencia física. Para Newton, los cambios en la naturaleza se producían “frente al fondo universal de un único río del tiempo que fluía uniformemente”¹⁶⁹. Pero Einstein hizo una pregunta fundamental: ¿Qué significa que dos eventos sean *simultáneos*¹⁷⁰? Para él sólo había una única respuesta: antes de responderla debemos sincronizar los relojes. “Y si uno quiere sincronizar dos relojes, tiene

169. Resumimos esto a partir de la obra de Peter Galison (2005), p. 11 y siguientes.
170. Esta situación se analizará más en detalle en el literal A.1.6: El principio de causalidad.

que empezar con uno, enviar una señal al otro y corregir el tiempo que tarda en llegar la señal”. Toda la discusión que se dio sobre este tema concluye que el concepto de simultaneidad está ligado al hecho físico de su medición. Primero era necesario separar las nociones (medidas) de espacio y tiempo. Es fácil medir el espacio: definir un sistema de coordenadas. Pero medir el tiempo entre dos sucesos, implica simultaneidad en su medida. Y no es posible pensar en un “reloj central” que determine el tiempo para el resto de los relojes. Se llegó a la extraordinaria conclusión de que dos sucesos que eran simultáneos en un sistema de referencia no lo eran en otro¹⁷¹ (Cfr. A.1.6). Esto impactó notablemente a la ciencia física. *La observabilidad de los fenómenos era una condición sin la cual estos no podrían ser estudiados. Y esta observabilidad requiere procedimientos definidos y también observables*, como en el caso de la sincronización de los relojes. De una posición ontológica, se pasó a una empirista.

A.1.2 Kant. Revolución copernicana del conocimiento

Se le llama *revolución copernicana* (e Ferrater Mora, 1994, p. 1989-) a la propuesta Kantiana acerca del problema del conocimiento porque, al igual que hizo Copérnico, el filósofo invierte los términos tradicionales en los que estaba planteado el problema (ver figura 1.2). Si en lugar de hacer girar los objetos alrededor del observador (así como los astros giraban alrededor de la tierra), el observador gira alrededor de los objetos (a la manera en que la tierra gira alrededor del sol), entonces no estará el sujeto regulado por los objetos sino al contrario: los objetos en tanto son percibidos deben ser regulados por nuestra facultad intuitiva, y en cuanto son pensados deben “ajustarse” a nuestra facultad intelectual (1999, Reale y Antiseri, , Tomo 2, p. 736). De esta manera, Kant dará una solución al problema del empirismo y racionalismo llevando a cabo su síntesis. Veamos.

En la Crítica de la Razón Pura leemos (Kant, 1984, p. 98): “Pero si es verdad que todos nuestros conocimientos comienzan con la experiencia, todos sin embargo, no proceden de ella, pues bien podría suceder que nuestro conocimiento

171. Ya Galileo había cuestionado los sistemas de referencia en cuanto al concepto de inercia o movimiento: es imposible saber estando en un barco, bajo cubierta y que se mueve en forma perfectamente rectilínea y sin balancearse, si está en reposo o en movimiento.

empírico fuera una composición de lo que recibimos por las impresiones y de lo que aplicamos por nuestra propia facultad de conocer, simplemente excitada por la impresión sensible”. Esto significa que podemos percibir los objetos a través de nuestros sentidos; a través de nuestro intelecto los podemos pensar. “(...) Primero los objetos tienen que ser dados, para después ser pensados” (Reale y Antiseri, *Op. Cit.* p. 737).

El hombre posee una sensibilidad, es decir, está dotado de sentidos a través de los cuales percibe espacio-temporalmente los objetos. Nosotros captamos los objetos o los acontecimientos tal como *aparecen* a través de la sensación y la percepción, y ésta “captación” es lo que se llama *fenómeno*. Así, pues, nosotros percibimos las cosas tal como se aparecen a nuestros sentidos y no como ellas son en sí mismas (Reale y Antiseri, *Op. Cit.*, p. 738-739): “Otros seres racionales, diferentes a los hombres, podrían captar las cosas de una manera no espacial y no temporal; nosotros captamos las cosas según una determinación espacial y temporal sólo porque nuestra sensibilidad está configurada de este modo (tenemos una sensibilidad que funciona así)”. Por ejemplo, nosotros captamos primero la luz del rayo y luego captamos el sonido.

Los fenómenos que percibimos no son suficientes para que los podamos conocer o podamos hacer juicios sobre ellos. En el ejemplo anterior, sólo captamos espacialmente la luz y el trueno y sucesión temporal, pero esa sola percepción no nos permite deducir que la luz sea más rápida que el sonido o que los dos eventos se rigen por determinadas leyes. Es necesario el concurso de nuestra facultad intelectual o racional la cual se constituye en la segunda fuente de conocimientos, la única que nos permite pensar los objetos. Mediante la primera fuente del conocimiento, los sentidos, los objetos nos son dados (la luz, el sonido); mediante la segunda, pensamos este material percibido. En palabras kantianas: “Ninguna de estas dos facultades debe anteponerse a la otra. Sin sensibilidad, no se nos daría ningún objeto, y sin intelecto, no podría pensarse ninguno. Los pensamientos sin contenido están vacíos, las intuiciones sin conceptos son ciegas... Estas dos facultades o capacidades no pueden intercambiar sus funciones. El intelecto no puede intuir nada y los sentimientos nada pueden pensar. El conocimiento sólo puede surgir de su unión (Reale., *Op. Cit.*, p.740)”.

El intelecto o pensamiento cuenta con unas leyes y unos principios que explican su funcionamiento o procedimiento. Estas leyes y principios se constituyen en lo que se conoce con el nombre de Lógica, que desde Aristóteles se la define como

el estudio de la manera en que el hombre piensa, deduce, infiere, concluye, es decir, de la manera en que el hombre elabora juicios. Estas maneras de pensar y deducir, de obtener conclusiones son llamadas las categorías del intelecto y son las que se aplican al material ofrecido por la percepción. Siguiendo nuestro ejemplo, yo puedo concluir que la luz del rayo que veo es la causa del trueno que escucho. Esta conclusión es un juicio que establezco y éste corresponde a la categoría de causalidad. Así pues, el entendimiento procede, según Kant, a través de doce categorías que corresponden a doce juicios, las cuales están subsumidas bajo cuatro títulos: cantidad, cualidad, relación, y modalidad.

En resumen, el conocimiento del mundo depende en gran medida de la manera en que estamos conformados: contamos con nuestros sentidos, los cuales nos permiten tener sensaciones que se sintetizan en percepciones. Estas percepciones, (lo que logramos captar, o sea los fenómenos), las organizamos espacio-temporalmente. Contamos además con el intelecto que funciona de determinada manera organizando el material ofrecido por nuestra sensibilidad y sintetizándolo en juicios de conocimiento. La tabla de la figura A.1.2 resume lo indicado anteriormente¹⁷².

A.1.3 El experimento de Torricelli

Los griegos conocían el fenómeno que se presentaba cuando se aplicaba a un tubo una bomba de vacío y se succionaba agua. Observaron cómo el agua llenaba el tubo.

Para explicar éste fenómeno, los filósofos Aristotélicos propusieron que la Naturaleza tenía un “horror al vacío”. No es natural, aseguraban, que exista el vacío; por lo tanto, la materia debe desplazarse para llenarlo siempre que éste se presente. También era conocido el hecho que una bomba de vacío ¡no podía elevar el agua más allá de 10,5 metros! Los Aristotélicos no explicaron porqué el “horror al vacío” terminaba allí (siglo -IV).

A partir de estos conocimientos Torricelli (siglo XVII) postula que la atmósfera ejerce presión sobre los objetos. Esta presión es suficiente para explicar el “horror al vacío”.

172. Tomado de <http://www.e-torredebabel.com/Historia-de-la-filosofia/Filosofiamedievalymoderna/Kant/Kant-DeduccionMetafisicaCategorias.htm>

TABLA DE LOS JUICIOS		TABLA DE LAS CATEGORÍAS	
Según la cantidad	Universales “Todo A es B”	De la cantidad	Unidad
	Particulares “Algún A es B”		Pluralidad
	Singulares “Este A es B”		Totalidad
Según la cualidad	Afirmativos “Es cierto que A es B”	De la cualidad	Realidad
	Negativos “A no es B”		Negación
	Infinitos “A es no B”		Limitación
Según la relación	Catagóricos “A es B”	De la relación	Inherencia y Subsistencia (substancia y accidentes)
	Hipotéticos “Si A es B, entonces es C”		Causalidad y Dependencia (causa y efecto)
	Disyuntivos “A es B, o C, o D...”		Comunidad (acción recíproca entre el agente y el paciente)
Según la modalidad	Problemáticos “A puede ser B”	De la modalidad	Posibilidad -Imposibilidad
	Asertóricos “A de hecho es B”		Existencia -No existencia
	Apodícticos “A necesariamente es B”		Necesidad -Contingencia

Juicios y categorías kantianas

Fig. A.1.2

Experimentando con tubos de diferentes diámetros y aproximadamente un metro de altura, Torricelli encontró, que utilizando el mercurio como fluido, la altura era la misma, sin importar el diámetro del tubo: aproximadamente 76 cm. a nivel del mar¹⁷³(Ver figura A.1.3).

Experimento de Torricelli

Fig. A.1.3

La explicación dada por Torricelli era la siguiente: el mercurio se mantiene dentro del tubo (que llamaremos “columna de mercurio”) debido a la presión atmosférica. El aire empuja hacia abajo la superficie del mercurio en la cubeta y cuando el peso de la columna iguala a este empuje, la columna se estabiliza (figura A.1.3 a).

Franciscus Linus, monje Jesuita, tenía otra hipótesis. Sostenía que en el espacio aparentemente vacío que se formaba en la parte superior de los tubos, existía una cuerda invisible que denominó *funiculus* (en latín “cuerdita”).

Cuando se empieza a formar el vacío, el “funiculus” ejerce una fuerza de atracción muy fuerte sobre los objetos que están a su alrededor; esta fuerza es la que succiona al mercurio hacia arriba manteniendo una altura determinada. Esta fuerza era proporcional al volumen de aire desalojado: por ello la atracción en el tubo mayor compensaba con una fuerza mayor el mayor peso del mercurio (figura A.1.3.b) Ambas teorías explicaban los fenómenos descritos.

¹⁷³. Torricelli sabía muy bien que no podía experimentar con agua. En ese caso habría tenido que manipular tubos de más de 10 metros de altura, lo que hacía el experimento difícil de realizar.

El peso del aire se podía constatar pesando un balón desinflado y luego lleno de aire. En 1654 se llevó a cabo un experimento crucial. Dos semiesferas grandes de cobre, huecas, de unos 500 litros de capacidad, que sellaban perfectamente y a las cuales se les podía extraer el aire mediante una bomba de vacío, fueron haladas por dos grupos de cuatro caballos y sólo se logró separarlas después de un gran esfuerzo. Sin embargo, al dejar que el aire las llenara, su separación no presentaba ningún problema. El experimento lo realizó el científico Alemán, Otto Von Guericke (que había inventado la bomba de vacío), en Magdeburgo, Alemania. Con esto se eliminaba toda duda de la presión ejercida por el aire.

La teoría de Linus también explicaba el resultado del experimento: la “atracción” de las esferas se debe a la fuerza que ejerce el funiculus sobre ellas.

La teoría de Torricelli permitía calcular el valor de la presión atmosférica, cosa que no podía hacer la teoría del funiculus.

Se sabe que el peso específico de un cuerpo es igual a $\rho = W/V$ (peso/volumen) y por lo tanto: $W = \rho \times V$ que es el peso del cuerpo en cuestión.

Recordemos por otro lado que la fórmula de la presión nos indica que $p = F/A$ (fuerza/área). Por lo tanto:

$$p = F/A = \rho \times V/A = \rho \times (hA)/A = \rho \times h = \\ 13.6 \times 76 \text{ (gmf/cm}^3\text{)} \times \text{cm}^2 = 1.033 \text{ kgf/cm}^2.$$

La primera observación es el hecho de cómo el área se cancela cuando se combinan ambas ecuaciones, explicándose, así, porqué la presión no depende del diámetro del tubo.

Una segunda observación nos lleva a un resultado sorprendente. La presión que el aire ejerce es de un kilogramo por centímetro cuadrado de acuerdo con el cálculo anterior. El cuerpo humano tiene, en promedio, un área de 2 metros cuadrados, es decir, $2 \times 10000 \text{ cm}^2$. Por lo tanto el peso de aire que soportamos es de: $F = pA = 1 \text{ kg/cm}^2 \times 20000 \text{ cm}^2 = 20 \text{ toneladas!}$ ¿Por qué, entonces no somos aplastados por tan enorme fuerza? En este punto la teoría del funiculus parece ser más aceptable (más acorde con el sentido común: no morimos aplastados por tan enorme fuerza). Lo que ocurre es que la presión ejercida por los fluidos internos es aproximadamente igual a la de la presión atmosférica. En el caso de la sangre, ésta es superior pero es contrarrestada por la presión que ejercen las paredes de las venas sobre ella.

Investigaciones posteriores afianzaron la teoría de Torricelli y descartaron la de Linus: las explicaciones del primero eran lógicas deductivas, podían medirse y predecían nuevos fenómenos; las de Linus, no.

Torricelli cumplía con los requisitos que debe tener una teoría formalizada:

- 1) Propuso una hipótesis: *El aire ejerce presión sobre los cuerpos que rodea.*
- 2) Utilizó otras conclusiones (deducciones) como es el caso del estudio de los griegos y el principio de Pascal con respecto a la presión ejercida en los cuerpos que son sumergidos en fluidos.
- 3) Existían definiciones claras: presión, peso, volumen, área.
- 4) Utilizó la matemática como procedimiento lógico deductivo.
- 5) Explicó fenómenos observados: la altura de la columna de mercurio y su valor, de 76 cm. La independencia del área con respecto al tamaño de los tubos.
- 6) Hizo predicciones: el valor de la presión que la atmósfera ejerce sobre los cuerpos que rodea.

A.1.4 Tipos de razonamiento

El término razonamiento puede verse desde el punto de vista psicológico (teoría del pensamiento) o desde el punto de vista lógico (procesos inductivos o deductivos, procesos formales) (Ferrater Mora, 1994, p. 3012).

Los razonamientos pueden ser correctos o incorrectos. Entre los incorrectos podemos citar el paralogismo y el sofisma.

En lo que respecta al sofisma podemos decir que se trata de una refutación aparente o de un silogismo aparente, que pretende defender algo falso haciéndolo aparecer como verdadero y con ello confundir al oponente.

Dentro de los razonamientos correctos están los silogismos, los cuales se destacan por su importante influencia en la lógica simbólica contemporánea. Aristóteles indicaba que no todo pensamiento es razonamiento (Atlas Univ. Filosofía, p. 104): el razonamiento es una sucesión de pensamientos relacionados (premisas) que llevan a conclusiones. El silogismo es un razonamiento mínimo: una premisa mayor, una premisa menor y la conclusión. Ya en el

capítulo 1, numeral 1.1.3.2 hicimos referencia al silogismo, el cual presentaremos en su forma original:

Si todos los hombres son mortales y

Si los griegos son hombres

Entonces todos los griegos son mortales.

Si leemos con atención, existe un término que aparece en ambas premisas pero no en la conclusión: la palabra “hombres”. “Hombres” es el corazón operativo del razonamiento: es la sustancia o razón del silogismo; se la denomina *término medio*, que está implícito en la conclusión.

El término medio puede ser sujeto o predicado, lo que da origen a cuatro tipos de silogismos diferentes.

El silogismo indicado arriba, denominado como un *procedimiento de primera figura*, era para Aristóteles el fundamento intuitivo de toda la lógica debido a su simplicidad y veracidad. Por esta razón, cualquier otro tipo de razonamiento debía reducirse a este; si esto era posible, el razonamiento debía necesariamente aceptarse.

La primera figura puede expresarse mediante la fórmula:

Si todo M es P , y

Si todo S es M ,

Entonces S es P .

En donde M es el término medio, P el predicado y S el sujeto. Los cuatro tipos de razonamiento silogístico se indican en la figura A.1.4.

Es posible facilitar este tipo de análisis utilizando los diagramas propuestos por Euler. Así, la primera figura sería equivalente al diagrama a) de la figura A.1.5.

El silogismo: todo griego (S) es un hombre (M), ningún hombre (M) es eterno (P), por lo tanto ningún griego es eterno, sería representado por b) en la misma figura.

	I figura	II figura	III figura	IV figura
P r e m i s a Mayor	M sujeto	M predicado	M sujeto	M predicado
P r e m i s a . Menor	M predicado	M predicado	M sujeto	M sujeto
Conclusión				

Cuatro tipos de razonamiento silogístico

Fig. A.1.4

Diagramas de Euler y silogismos

Fig. A.1.5

Usando la lógica simbólica, podríamos escribir, con respecto a la figura I:

$\forall M \rightarrow P, \forall S \rightarrow M$; reorganizado: $\forall S \rightarrow M, \forall M \rightarrow P$. Por lo tanto $\forall S \rightarrow P$. El silogismo posee relación de orden (Cfr. numeral 5.2).

Para el silogismo de la segunda figura (diagrama b) de la figura A.1.5) tendremos:

$\forall S \rightarrow M, \sim M \rightarrow P$ (o su equivalente $M \rightarrow \sim P$) se concluye que $\forall S \rightarrow \sim P$. El silogismo es reducido a uno de la primera figura.

A.1.5 Experimentos mentales

Otro ejemplo. Lovett Cline (1973) relata las discusiones entre Bohr y Einstein sobre el principio de indeterminación de Heisenberg. Expliquemos un poco este principio.

Para representar gráficamente la trayectoria en el interior del átomo se debe multiplicar la posición del cuerpo en algún instante de tiempo por su momento (producto de su masa por su velocidad) en el mismo instante. En términos de la mecánica cuántica esto se expresa como $p \times q$. Pero Heisenberg había demostrado que, en su sistema de descomposición de frecuencias, este producto era diferente a $q \times p$. Cuando se halló la diferencia entre estas dos cantidades, se encontró que su valor era siempre el mismo e igual a la constante h de Plank. A partir de este hecho, Heisenberg postuló que si los dos productos eran diferentes entonces la forma como se realizara la medición incidiría en el resultado. Por lo tanto, *cuando una posición experimental dada es definida exactamente, su correlato, el momento, no puede serlo* (Lovett Cline, p. 269): éste es el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica¹⁷⁴. Esta incertidumbre no agradaba a Einstein, quien se propuso analizarla a fondo con Niels Bohr. Einstein elaboraba continuamente experimentos mentales que Bohr refutaba uno tras otro. Al final, siempre se encontraron fallas de razonamiento en los argumentos de Einstein, pero con esto queremos destacar que este tipo de experimentos tienen trascendental importancia particularmente en la ciencia moderna, en donde el acceso directo a los elementos involucrados es prácticamente imposible y, por lo tanto, sólo por las consecuencias se puede aceptar o no una hipótesis.

Uno de los últimos experimentos de Einstein consistió en relacionar su conocida ecuación: $E = mc^2$ mediante la cual se podía determinar la energía de un fotón, con su masa, y demostrar que el principio de incertidumbre no era correcto. Propuso una caja llena de espejos que encerraría un haz de luz, quedando así la radiación detenida. Se pesaba la caja y mediante un mecanismo de reloj muy preciso, en un instante preestablecido, por una escotilla se dejaría salir entonces un fotón. La caja se pesaría de nuevo y la diferencia de peso daría la masa del fotón, y con ello la energía liberada. De esta manera el cambio de energía sería medida con precisión en un instante dado. Se habría

174. Algunos autores diferencian la mecánica clásica de la cuántica de acuerdo con los valores de q y p : cuando q y p son muy grandes con respecto a h , estamos en el dominio de la física clásica.

medido entonces p y q con exactitud, contradiciendo el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Bohr refutó el experimento suponiendo que la caja estaba suspendida en un muelle que permitía calcular el peso de la caja en cualquier instante. Al ser liberado un fotón, la caja se movería hacia arriba dentro del campo gravitatorio terrestre. De acuerdo con la teoría de la relatividad, este cambio implicaría un cambio en la marcha del reloj dispuesto de antemano en la caja. El cambio sería pequeñísimo, pero decisivo en este caso. Una cadena de incertidumbres (la dirección del fotón saliente, la dirección de respuesta de la caja, y con ello su posición en el campo gravitatorio terrestre) impediría conocer el momento preciso de la salida del fotón.

A.1.6 El principio de causalidad

La causalidad implica que ciertos sucesos sean *necesarios* (son *condicionales*) para que otros sucesos ocurran¹⁷⁵. Así, la combustión se explica por la presencia de oxígeno: sin oxígeno (es necesario que esté presente), no hay combustión; sin reforzamiento no hay aprendizaje. Por otra parte, los sucesos pueden ser *suficientes* para generar el efecto. Por ejemplo, es suficiente que haya oxígeno para que exista la combustión, mas no necesario, ya que, aún si hay oxígeno, sin una chispa que inicie el proceso, no habría combustión. A menudo se refuerza la relación diciendo que es *necesaria y suficiente* cierta causa para que se produzca el efecto: es necesario y suficiente, frente a una vela, que haya oxígeno para que se produzca una combustión. Cuando la explicación causal se aplica a cada caso de una clase de sucesos, regularidades o estructuras decimos que la explicación es *universal*: la relación causa-efecto debe ser única, del tipo “es necesario y suficiente que...”. Pero cuando las causas son de diversa índole y pueden ser simultáneas esta universalidad no se aplica. El caso clásico son las explicaciones de enfermedades en medicina. El cáncer, por ejemplo, tiene tanto causas genéticas como ambientales.

La causalidad está íntimamente ligada al determinismo. Su fundamento es el *principio de razón suficiente*: *todo fenómeno tiene una explicación suficiente*.

175. Ideas extraídas de Greenwood (2011) y Sauval (<http://www.sauval.com/articulos/milner1a.htm#Fisica>).

No existen fenómenos fortuitos; lo que ocurre es que no tenemos una capacidad de análisis total.

Esta posición ha sido ampliamente debatida por filósofos de la ciencia, y a pesar de las dificultades que ella genera la física clásica se ha construido a partir de esta premisa. Es el fundamento sobre el cual se establecen sus leyes. El determinismo está limitado por nuestra capacidad de medición y nuestra capacidad de aprender. Desde un punto filosófico es tan imposible probar que el determinismo causal es exacto, como demostrar que no lo es.

Siguiendo a Papineau (2008, p. 20) durante el siglo XX se ha desarrollado una interesante idea: causa es "aquello que marca la diferencia". Comer en abundancia es la causa de que aumentemos de peso tiene sentido si este exceso de alimento marca la diferencia en caso de no haberlo hecho: si todo lo demás hubiera permanecido constante y no se hubiera comido en exceso, no se habría aumentado de peso. Esto se conoce como causalidad *contrafactual* ya que considera otras posibles causas. Sin embargo esta teoría también tiene dificultades en su aplicación tema que no desarrollaremos aquí.

En algunas partes de este texto se hace referencia al uso de la estadística como herramienta de medición en la ciencia física (y en la ciencia en general). Es el *determinismo estadístico* que busca subsanar las dificultades del determinismo clásico: ya no se puede basar el conocimiento en una sola medida experimental, sino en una serie de ellas.

Otra forma de sobreponerse al determinismo es la *causalidad indeterminista*. Citemos a Papineau (p. 22):

Entonces, ¿qué le ocurre a la causalidad cuando el determinismo no parece sostenible? Algunos dicen que los sucesos que no están determinados no tienen causa; pero esto implica que las explosiones nucleares (que son producidas por la desintegración nuclear) no son causadas, y evidentemente esto no es plausible. La teoría alternativa propone la causalidad indeterminista: las causas no determinan los efectos, únicamente los hacen más probables. Según esta teoría, se podría decir que la explosión nuclear ha sido provocada por la desintegración radiactiva, aunque el proceso de desintegración se base únicamente en probabilidades. Y lo mismo se podría decir del fumar y el cáncer: fumar aumenta las probabilidades de que la persona sufra cáncer, y eso basta para poder afirmar que fumar es la causa del cáncer.

Pero queda otra situación por analizar: la relación del tiempo con la causalidad. Implícitamente en la relación causal, la causa *precede* al efecto, está *antes* del efecto. Después de la teoría especial de la relatividad de Einstein, en donde el tiempo-espacio no es absoluto sino relativo, esta correlación no siempre es verdad.

Siguiendo a Hewitt (*Op.Cit.* p. 689-) recordemos los postulados de la teoría de la relatividad especial de Einstein:

- Todas las leyes de la naturaleza son iguales en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme.
- La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido por todos los observadores, independientemente del movimiento de la fuente o del movimiento del observador; esto es, la rapidez de la luz es una constante.

A partir de estos postulados podemos establecer el concepto de *simultaneidad* en Einstein (utilizar las figuras A.1.6 a) y b)).

En una nave espacial, un observador se sitúa exactamente en la mitad de la nave, en donde se encuentra una fuente de luz. Cuando se enciende esta, la luz se difunde en todas direcciones con una rapidez igual a c . Por ser la fuente y el observador equidistantes de los extremos de la nave este ve llegar, simultáneamente, los haces de luz que iluminan el frente y el fondo de la nave (ver figura A.1.6.a). Esto es válido sea que el vehículo espacial esté en reposo o con velocidad constante. Los eventos son *simultáneos* para este observador.

Consideremos ahora el caso de otro observador que mira a la nave desde un planeta que está en reposo con respecto a dicho observador (Fig. A.1.6 b).

Para él, estos eventos *no son simultáneos*. A medida que la luz se desplaza hacia el frente de la nave, el cohete avanza, por lo que la parte trasera de la nave se mueve hacia la luz, mientras que la delantera se aleja de ella. El rayo que va hacia la parte posterior (la izquierda) recorre menos espacio que el que se dirige hacia la parte frontal (la derecha). Como la rapidez de la luz es la misma en ambas direcciones, este observador ve llegar primero la luz a la parte trasera que a la delantera. Si le agregáramos a nuestro ejemplo otro cohete que viniera en sentido contrario del primero, él vería el fenómeno diferente: primero llegaría la luz a la parte frontal y luego a la parte posterior de la nave. Esto es consecuencia del hecho de que la velocidad de la luz es la misma, no importa el marco de referencia con que se mire.

Fig. A.1.6 a)

Fig. A.1.6 b)

Relatividad de la simultaneidad

Finalicemos de nuevo con Papineau (p. 23):

El concepto de causa no puede ser eliminado de la comprensión del mundo. Y si no es posible reducirlo a otros conceptos, entonces quizá sería correcto concluir que el de causalidad es un concepto fundamental para el ser humano. Muchos filósofos han argumentado que términos como "verdad" y "realidad" no pueden ser definidos, y sin embargo están entre los conceptos más importantes que existen. Lo mismo ocurre con el de "causa": tal vez no haya modo de explicarlo a partir de otros conceptos más básicos.

APÉNDICE CAPÍTULO 2

A.2.1 Sistema axiomático de Peano

El matemático italiano Giuseppe Peano estableció una serie de axiomas que permitían sustentar lógicamente las operaciones básicas de la aritmética independientemente de cualquier significado práctico que pudieran tener. Propuso cinco axiomas (Newman, J.R. compilador, 1969 Tomo 5, p. 11-):

A1: 0 es un número.

A2: El sucesor de cualquier número, es un número.

A3: Dos números no tienen nunca el mismo sucesor.

A4: 0 no es el sucesor de ningún número.

A5: Si P es una propiedad tal que:

a) 0 tiene la propiedad P y

b) siempre que un número n tenga la propiedad P , entonces el sucesor de n también tendrá la propiedad P y por lo tanto todo número tendrá la propiedad P .

Construcción de los números enteros. 1 es definido como el sucesor de 0: ($0' = 1$). 2 es el sucesor de 1: ($0'$)' = $1' = 2$ y así indefinidamente gracias a A2. De acuerdo con A3 y A5 el proceso nunca conducirá a números definidos anteriormente.

Definición de suma.

D1: a) $n + 0 = n$; b) $n + k' = (n + k)'$

Por ejemplo: $3 + 2 = 3 + 1' = 3 + (0')'$ de acuerdo con a) de D1.

De b) $3 + (0')' = [(3 + 0)']' = (3')' = 5$. La “verdad” $3 + 2 = 5$ queda aquí excluida de cualquier realidad. Es un resultado axiomático.

Definición de multiplicación.

D2: a) $n * 0 = 0$; b) $n * k' = nk + n$

Por ejemplo: $3 \times 2 = 3 \times 1' = 3 \times (0')' = 3 \times (0') + 3 = 3 \times 0 + 3 + 3 = 6$.

El ejercicio se puede continuar y deducir las leyes asociativas, conmutativas y distributivas de la adición y la multiplicación. También es posible definir la resta, la división y la potenciación. Igualmente se puede pasar a los números negativos y a los racionales, al concepto de raíz cuadrada y en general a toda la teoría de la aritmética.

A.2.2 Euclides, Riemann y Lobachevski

Hemos dicho que los axiomas y postulados son verdades por principio; no se demuestran. Sin embargo, existe siempre la duda de, hasta donde, es aceptable este o aquel enunciado. Un caso interesante es el quinto postulado de Euclides, el postulado de las paralelas. Euclides formuló su postulado en estos términos: “si una recta, al encontrarse con otras dos rectas, produce dos ángulos internos colocados del mismo lado, inferiores a dos ángulos rectos, dichas rectas – si se prolongan hasta el infinito – se encontrarán del mismo lado en que están los ángulos inferiores a dos rectos”. La figura A.2.1 ilustra el enunciado (de Reale y Antiseri, *Op. Cit.* Tomo III, p. 328-330).

Postulado de las paralelas en Euclides

Fig. A.2.1

La forma más conocida de este postulado nos dice que si tenemos en un plano una recta s y un punto P exterior a ella, en el plano sólo existe una recta r que pase por el punto P y sea paralela a la recta s , en el sentido de que jamás la encuentre. Esto ocurre cuando la recta s y la recta r , al ser cortadas por una recta t , forman con ella, o ángulos rectos, o dos ángulos cuya suma es igual a dos rectos (ver figura A.2.2).

Otra representación del postulado de las paralelas

Fig. A.2.2

Estos enunciados, aparentemente verdaderos, tienen su limitación. En efecto, dependen de su contexto. Por ejemplo, si el postulado se analiza para rectas contenidas en un círculo de radio dado, es evidente que, dentro del círculo existe un infinito número de rectas que cumplen con él. La figura A.2.3 muestra lo afirmado. Podemos seguir ampliando el círculo, y aún así existirían infinitas rectas que seguirían cumpliendo con el postulado.

Posibilidad de infinitas paralelas desde P a S

Fig. A.2.3

Por otra parte, ¿por qué debe existir la recta r ? Para esta opción consideremos el siguiente análisis (ver figura A.2.4).

Duda de la existencia de la recta paralela

Fig. A.2.4

Sea un punto P exterior a una recta s . Por P pasa una recta r que intercepta a s en el punto A . Para que r se convierta en paralela a s hagámosla girar de tal manera que intercepte a s en los puntos B, C, D etc. Estos puntos se alejarán cada vez más de A , pero, ¿cuándo en el plano infinito se separará r de s ? ¿Cómo nos daremos cuenta de tal separación? ¿Es absurdo afirmar que dos rectas paralelas se encuentran en el infinito?

No aceptar este postulado dio origen a otros tipos de geometrías, como, la de Lobachevsky (similar a la de Bolyai) y la de Riemann. Por ejemplo, en la geometría de Riemann, dos rectas cualesquiera de un plano siempre tienen por lo menos un punto en común, en otras palabras, no existen rectas paralelas. Esto es lo que ocurre en una esfera. Aquí la esfera corresponde al plano y las rectas son circunferencias máximas, es decir, aquellas que cortan a la esfera mediante planos que pasan por su centro, como es el caso de los meridianos y el ecuador (ver la figura A.2.5).

Imposibilidad de la existencia de dos rectas paralelas

Fig. A.2.5

Es fácil observar que no es posible que dos rectas (dos circunferencias máximas) no se encuentren. En esta geometría es posible trazar un número infinito de perpendiculares a una recta. Incidentalmente, en esta geometría la suma de los ángulos internos de un triángulo suman más de 180° .

En cuanto a Lobachevsky podemos indicar lo siguiente. Consideremos la figura A.2.6, en la cual la recta AB es perpendicular a la recta CD (Kassner & Newman, 1987, p. 145-).

Posibilidad de infinitas rectas paralelas entre sí

Fig. A.2.6

Hagamos girar la recta AB alrededor del punto A en sentido contrario a las agujas del reloj. Durante este proceso la recta cortará la recta CD en puntos situados a la derecha de B hasta alcanzar la posición límite EF en la cual será paralela a CD . Para Euclides, existe sólo una posición para que esto ocurra, y es la recta EF . Lobachevsky supuso que habría dos de estas posiciones: $A'B'$ y $C'D'$. De hecho hay infinitas: todas las rectas contenidas en el ángulo $A'AC'$ (o $D'AB'$). Este ángulo puede hacerse tan pequeño como se quiera de tal manera que por más que se prolonguen las rectas $A'B'$ y $C'D'$ nunca cruzarán a CD . Evidentemente no se trata de geometría en un plano. Nuestra intuición nos dice que el espacio es finito, por lo que tal suposición es completamente plausible.

Los otros cuatro postulados de Euclides son respetados en esta geometría. Muchos de los teoremas de la geometría clásica tienen su equivalente en la de Lobachevsky. Pero otros no (Igual ocurre para la de Riemann). Tal es el caso de la suma de los ángulos interiores de un triángulo: en Euclides siempre será 180° ; en Lobachevsky será inferior a 180° .

La figura A.2.7 muestra lo que se llama una *pseudoesfera* (Kassner & Newman, *Op. Cit.*, p. 151).

Pseudoesfera

Fig. A.2.7

Sea G una “línea” de la pseudoesfera. Desde el punto O se traza una perpendicular a la línea G . A una distancia s de P se traza el punto Q y desde allí se traza otra perpendicular a G . Tracemos un círculo de radio s con centro en O . Esta circunferencia cortará a QT en s_1 y s_2 . Estos dos puntos, al ser unidos con O , determinan las dos rectas P_1 y P_2 que son ambas paralelas a G . Todas las líneas que pasan por O , formando un ángulo menor que el ángulo α no cortan a G , aun cuando no le son paralelas.

Si Riemann es la geometría de la esfera, Lobachevsky es la geometría de la silla de montar.

APÉNDICE CAPÍTULO 3

A.3.1 No direccionalidad del tiempo en Newton

Para comprender la idea de que el tiempo no tiene dirección en la mecánica Newtoniana (lo que se conoce como *simetría temporal* de las ecuaciones newtonianas), consideremos el siguiente ejemplo tomado de Reichenbach (1971, p. 35-)

Lancemos una esfera de A a C con una velocidad cuyas componentes horizontal y vertical son a_1 y a_2 , como se muestra en la figura A.3.1.

Lanzamiento parabólico

Fig. A.3.1

Las ecuaciones que describen este movimiento son las siguientes (Cfr. Ec. (3.1)):

$$x_1 = a_1 t, x_2 = a_2 t - \frac{gt^2}{2}, t \geq 0 \quad (\text{A.3.1})$$

Si cambiamos a t por $-t$ tendremos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$x_1 = -a_1 t, x_2 = -a_2 t - \frac{gt^2}{2}, t \geq 0 \quad (\text{A.3.1})'$$

Este último proceso es compatible con las leyes de la mecánica y ocurre en la realidad. Es el caso de una bola lanzada de C a A con velocidad igual a la esfera anterior. El lanzamiento de una bola es un proceso reversible. De hecho cualquier movimiento lo será. Nótese que $-x_1$ es la dirección contraria a x_1 .

Por otra parte, las ecuaciones que describen los movimientos en Newton, son ecuaciones diferenciales de segundo orden sin derivadas de primer orden. Esto implica que en toda ecuación si se cambia t por $-t$, las segundas derivadas serán las mismas, por lo que este cambio no afecta en nada la descripción del proceso y los cálculos obtenidos.

El concepto de fuerza, fundamental en la mecánica de Newton tampoco es afectado. Recordemos que $F = ma$. La fuerza implica un desplazamiento. Sea $x(t)$ tal desplazamiento. La partícula adquirirá una velocidad que es igual a $v(t) = dx(t)/dt$. A su vez la aceleración es la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, es decir $a = dv(t)/dt = d^2(x)/dt^2$. Si t se cambia por $-t$, la primera derivada será negativa pero la segunda será positiva y la fuerza no habrá sufrido ninguna modificación ni en magnitud, ni en sentido.

Los análisis físicos con respecto al tiempo consideran que éste tiene como objetivo únicamente establecer puntos de referencia para localizar partículas en el espacio. Desde esta perspectiva el tiempo no existe. Los sistemas son determinados, son atemporales. Pero esto es el resultado de un cálculo no un análisis del determinismo como tal. Se trata de un análisis desde la física.

Pero la filosofía, como se ha indicado en este texto, se ocupa de asuntos relacionados con las ecuaciones de la física, no con las ecuaciones en sí. Habla en un metalenguaje, no en un lenguaje objeto. Remitimos al lector a la cita del numeral 2.3.

A.3.2 Análisis matemático de la ley de los graves de Aristóteles

Recordando la cita de Aristóteles (numeral 1.1.3.3) sobre la caída de los graves podemos hacer el siguiente análisis.

Aristóteles no sólo tuvo en cuenta el peso del cuerpo que cae sino también la resistencia ofrecida por el medio en el cual cae. El sabía, por ejemplo, que una piedra cae más lentamente en el agua que en el aire. Es natural postular, enton-

ces, que la velocidad es inversamente proporcional a la fuerza de resistencia. Existen por lo tanto dos fuerzas opuestas: la del peso del cuerpo que cae, y la resistencia del medio que se opone a la caída. Sólo puede existir la caída si el peso del cuerpo supera la resistencia del medio: esto explica porqué la piedra no puede caer a través de la tierra sólida. Por otra parte, entre mayor sea el peso con respecto a la resistencia, mayor será la velocidad.

Esta regla es plausible pero debería verificarse experimentalmente. Sin embargo, desde un punto de vista matemático surgen consecuencias inesperadas. Si la velocidad v es directamente proporcional al peso W e inversamente proporcional a la resistencia R , podemos escribir:

$$v \propto W/R \quad \text{o} \quad v = kW/R \quad (\text{A.3.2})$$

en donde k mide la forma como el peso y la resistencia se comportan en el medio. Nótese que a doble peso, doble velocidad, como lo sostenía Aristóteles.

Sin embargo si $W = R$ la velocidad v sería igual a k , y no a cero como debiera ser. Por otra parte, si $W \leq R$, el cuerpo tendría una velocidad, lo cual va en contra de la lógica (y la realidad).

La ecuación A.3.2 no, es pues, una forma correcta de analizar la caída de los graves.

Por otra parte, en el vacío ($R = 0$) la piedra caería con velocidad infinita, sin importar el peso del cuerpo. Por esta razón, los partidarios de Aristóteles sostenían que el vacío era inconcebible. La propuesta aristotélica, es pues, inaceptable.

Philoponus de Alejandría había propuesto, en el siglo V d.c. la ecuación

$$v = W - R \quad (\text{A.3.3})$$

De acuerdo con ella, a medida que R decrece, para un mismo peso, v aumenta. Cuando R sea igual a W la velocidad sería cero, lo cual indica un comportamiento mejor descrito que la ecuación A.3.1. Se aceptaría que $v = 0$ para $W \leq R$. Sin embargo, la ecuación permite que el cuerpo se mueva en el vacío, pues para R igual a cero la velocidad sería igual al peso del cuerpo. La dificultad en las unidades se resolvería agregando una constante k a la ecuación A.3.3.

A.3.3 Otro ejemplo de isomorfismo

Sea un oscilador mecánico formado por un resorte de coeficiente k del cual está suspendida una masa M , que hace descender el extremo del resorte en una cantidad s (ver figura A.3.2) (Sokolnikoff & Redheffer, 1958, p. 80-82).

Péndulo de resorte

Fig. A.3.2

Una vez equilibrado el sistema, si halamos el resorte la distancia y , y lo soltamos, en ausencia de todo tipo de fricción él oscilará continuamente.

Aplicando las leyes de Newton se puede demostrar que la ecuación general que rige a este sistema es:

$$M d^2 y / dt^2 + ky = 0 \quad (\text{A.3.4})$$

Consideremos ahora otro sistema completamente diferente. Se trata de un circuito eléctrico compuesto por un condensador C que se descarga a través de un solenoide de resistencia despreciable, de inductancia L (Fig. A.3.3).

También es posible demostrar que la ecuación que rige la dinámica de este sistema oscilatorio viene dada por:

$$d^2 Q / dt^2 + \frac{1}{CL} Q = 0 \quad (\text{A.3.5})$$

Circuito CL

Fig. A.3.3

en donde $Q = CV$ (que es la carga en el condensador). Si multiplicamos la ecuación A.3.5 por L y la comparamos con la ecuación (A.3.4) tendremos las siguientes equivalencias: $L \rightarrow M$, $k \rightarrow 1/C$.

Estos dos sistemas, en apariencia totalmente diferentes, son estructuralmente iguales. Son pues, isomorfos. De hecho, podemos construir un sistema mecánico, que oscile bajo ciertas condiciones de diseño, a partir del sistema eléctrico correspondiente. Es más sencillo comprobar los efectos de diferentes valores de L que de masas, y diferentes valores de C que de constantes k de resortes. El diseño mecánico se facilita enormemente a partir de uno eléctrico gracias a este isomorfismo.

APÉNDICE CAPÍTULO 4

A.4.1 Colisión entre dos esferas

Cuando una esfera A de masa m_A , que viaja a una velocidad v_A , choca con otra esfera de masa B que está en reposo ($v_B = 0$), en el vacío, la esfera A se detiene ($v_A' = 0$) y la B sale con una velocidad v_B' , si ambas masas son iguales. Para facilitar el análisis supondremos que, durante el proceso, ninguna de las esferas cambia de dirección: los vectores están sobre la misma línea y en idéntica dirección. Como el sistema se considera cerrado la ley de la conservación de la cantidad de movimiento (LCCM) nos dice que (Holton, *Op. Cit.* p. 347-348) :

CM antes del choque = CM después del choque

Matemáticamente:

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B' \quad (\text{A.4.1})$$

Como v_A' y v_B valen cero, entonces:

$$m_A v_A + m_B \times 0 = m_A \times 0 + m_B v_B' \quad (\text{A.4.2})$$

$$v_B' = (m_A / m_B) \times v_A \quad (\text{A.4.3})$$

Si las masas de las dos esferas son iguales, entonces, $v_B' = v_A$, "como cualquier billarista lo sabe". En caso de no serlo, un análisis similar nos lleva a la conclusión que:

$$v_B' = (m_A / m_B) (v_A - v_A') + v_B \quad (\text{A.4.3a})$$

¿Qué pasaría si el choque no es elástico y después del choque ambos cuerpos quedan unidos y deformados?

En este caso $v'_A = v'_B$, (ya que se forma un solo cuerpo) son las incógnitas. De acuerdo con la ecuación A.4.1 tenemos:

$$m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B) v'_B \quad (\text{A.4.4})$$

$$v'_B = (m_A v_A + m_B v_B) / (m_A + m_B) \quad (\text{A.4.5})$$

Nada impide que cambiemos los signos de las velocidades. Supongamos hora que la segunda esfera viaja en dirección contraria a la de A, la cual ahora se encuentra en reposo. El análisis nos dará como respuesta una velocidad de A igual a la que tenía al principio de nuestro análisis quedando B en reposo. El tiempo es reversible, igual como lo es el fenómeno.

También es posible analizar el caso cuando una bola golpea a otras dos. Aunque el modelo es más complejo, se puede determinar con exactitud el comportamiento de todo el sistema, siempre y cuando una bola sea golpeada antes que la otra, así sea en un infinitésimo de tiempo. De no ser así la situación corresponde a la teoría del caos.

A.4.2 Deducción de la ley de la caída libre

A partir de los conceptos de velocidad media y aceleración, podemos deducir una importante ley que relaciona el espacio recorrido por un móvil que posee una velocidad inicial v_0 y es sometido a una aceleración a (Holton, *Op. Cit.*, p. 105-).

La velocidad media es la relación entre la distancia recorrida s dividida por el tiempo t que se tarda en recorrerla. La aceleración es la razón de la variación de velocidad y el tiempo t que se tarda en lograr tal variación. En forma de ecuaciones:

$$\bar{v} = s / t, \quad a = (v_f - v_0) / t \quad (\text{A.4.6})$$

De la ecuación de aceleración obtenemos:

$$v_f = v_0 + at \quad (\text{A.4.7})$$

Con respecto a la velocidad media podemos hacer el siguiente análisis. Sea un cuerpo con velocidad inicial v_0 sometido a una aceleración uniforme a durante un tiempo t en el cual alcanza una velocidad v_f . La distancia recorrida por el móvil es la misma que si el cuerpo hubiera tenido una velocidad media (velocidad constante igual al valor medio de v_0 y v_f durante el mismo intervalo de tiempo t .

Sea s la distancia cubierta por el móvil con las condiciones anteriores. Tendremos que:

$$s = (v_0 + v_f)t / 2 \quad (\text{A.4.8})$$

Reemplazando v_f (de A.4.12) en (A.4.8) tendremos:

$$s = (v_0 + v_f)t / 2 = (v_0 + (v_0 + at)t) / 2 \quad (\text{A.4.9})$$

Es decir:

$$s = v_0 t + 1/2 at^2 \quad (\text{A.4.10})$$

No hay ninguna hipótesis sobre la dirección del movimiento. En ausencia de fricción, esta fórmula nos permite calcular la distancia recorrida por un móvil durante un tiempo t que parte con una velocidad inicial v_0 , y es sometido a una aceleración uniforme a durante el tiempo t .

Si hacemos $v_0 = 0$, y $a = g$ (la aceleración de la fuerza de gravedad), tendremos la ecuación de la caída libre:

$$h = 1/2 gt^2 \quad (\text{A.4.11})$$

A.4.3 Termostato

Son aparatos de control que abren o cierran circuitos eléctricos de acuerdo con la temperatura. Los hay mecánicos y electrónicos. El más sencillo de tipo mecánico consiste en dos láminas de metal, unidas, con diferente coeficiente

de dilatación, de tal manera que cuando la temperatura alcance cierto valor se curva activando un circuito eléctrico (ver figura A.4.1).

Termostato bimetalico (<http://termometria.galeon.com/curiosidades.htm>)

Fig. A.4.1

Otro tipo de termostato mecánico es el de gas en el cual un gas es encerrado en un recipiente sellado. Cuando la temperatura sube el gas se expande y empuja una válvula que hace contacto con un circuito eléctrico; cuando se enfría, se contrae. El resultado es conectar o desconectar el sistema según sea el caso.

El electrónico consta de un termistor (semiconductor que varía su resistencia eléctrica en función de su temperatura). Esta variación es leída por un microprocesador el cual es programado para efectuar diferentes acciones de acuerdo a las temperaturas censadas.

A.4.4 Taxonomía. Sistema de Linneo

La taxonomía es la rama de la biología que busca la clasificación de los seres vivos de acuerdo con sus principales características. Esta clasificación intenta ordenar a todos y cada uno de los seres de la naturaleza de tal manera que cada uno ocupe un lugar en ella. Según Linneo, se realiza con base en las siguientes categorías:

- 1- *Reino*: existen dos: vegetal y animal¹⁷⁶.
- 2- *Phylum o división (tipo)*: es un conjunto de clases.
- 3- *Clase*: es un conjunto de orden.
- 4- *Orden*: es un conjunto de familia.
- 5- *Familia*: conjunto de géneros.
- 6- *Género*: es un conjunto de especies.
- 7- *Especie*: es un conjunto de individuos.

La definición de especie, base de la clasificación, no es muy clara. Se acepta como definición de especie biológica al grupo o población natural de individuos que pueden cruzarse entre sí, pero que están aislados reproductivamente de otros grupos afines. La especie biológica es libre de seguir su propio curso evolutivo en respuesta a las influencias del ambiente. Actualmente el estudio del ADN permite precisar aún más esta definición. Pero la determinación de los límites de una especie sigue siendo subjetiva. Para indicar las dificultades que se presentan, consideremos la siguiente cita (<http://es.wikipedia.org/wiki/Especie>.):

Este concepto tiene limitaciones respecto a organismos que se reproducen asexualmente (por apomixia: tipo de partogénesis) algunas especies de rotíferos (organismos microscópicos), moluscos, artrópodos, vertebrados, (algunos peces y lagartijas del género *Cnemidophorus* y *Aspidoscelis* Reeder 2002) y algunas plantas vasculares. Existen también muchos casos de hibridación en los que se produce descendencia fértil y que permanecen como unidades genéticas y evolutivas independientes. Este caso se da fundamentalmente en plantas vasculares en las que la hibridación es común. Para darnos una idea acerca de qué pasaría si el concepto de especie biológica fuese aplicado a estos casos, debemos indicar que cada individuo debería ser considerado como especie biológica separada.

Un ejemplo tradicional es la clasificación del *hombre*:

Reino: Animal

Phylum: Vertebrado

176. Actualmente se identifican cinco reinos: móneras (bacterias y cianobacterias), protistas (organismos unicelulares a mitad de camino entre vegetal y animal), hongos (no clasificables como plantas), plantas y animales.

Clase: Mamífero
Orden: Primate
Familia: Hominidae
Género: Homo
Especie: Sapiens

La clasificación de Linneo se basa en un sistema binomial para identificar las especies. Dos nombres: el género, y la especie generalmente en cursiva. El género refleja las características familiares y la especie las características particulares. Así, el hombre será HOMUS (género) *sapiens* (especie). El género va con mayúsculas siempre y la especie en minúsculas, salvo si se trata de un país o nombre propio. Las familias generalmente terminan en *us*, *e* y el género en *ae*. El autor va después del género-especie en paréntesis. Así, las orquídeas pertenecen a la familia *orchidaceae*. Su clasificación científica es:

Reino: Plantae
División: Magnoliophyta
Clase: Liliopsida
Orden: Asparagales
Familia: Orchidaceae

Colombia tiene una gran riqueza en esta familia, y su flor nacional es la *Catleya trianae* (J.J. Triana).

A.4.5 Diagramas de proceso

Un diagrama de proceso es una secuencia de símbolos que describen un proceso productivo (secuencia de actividades). En el diagrama se incluyen detalles tales como distancias, tiempos, cantidades. Estos diagramas permiten analizar procesos con el fin de mejorarlos desde el punto de vista de la eficiencia, o sirven como modelo de producción para ilustrar a los obreros sobre las labores que desempeñan. Son cinco los elementos básicos que permiten estas descripciones. La tabla de la figura A.4.2 indica cada uno de ellos con una descripción del mismo.

Símbolo	Descripción
○	<i>Operación.</i> Acción que modifica el producto o que establece una referencia al mismo.
□	<i>Inspección.</i> Controla si una operación se ha efectuado de acuerdo con las normas de producción en cuanto a cantidad o calidad.
⇒	<i>Transporte.</i> Acción de trasladar un objeto de un lugar a otro, siempre y cuando esta no forme parte de una operación o sea el resultado de realizar una operación o inspección.
D	<i>Demora.</i> Indica suspensiones temporales durante el proceso, que forman parte del procedimiento.
△	<i>Almacenamiento.</i> Indica que el objeto está en un almacén bajo vigilancia.

Símbolos de los diagramas de procesos

Fig. A.4.2

Consideremos el siguiente proceso productivo. Se trata de fabricar un elemento que se compone de dos placas cuadradas de hierro de 8 cm de lado por 2 cm de ancho, que deben ser unidas por un tornillo de 1 cm de diámetro, con una tuerca en el extremo derecho. La figura A.4.3 da una idea al respecto.

El proceso de fabricación es como sigue. Los tornillos se fabrican a partir de un tubo de hierro de 1 cm de diámetro, que se corta en trozos de 4.5 centímetros. Tanto la cabeza del tornillo como la tuerca se obtiene trozando un bloque cuadrado de hierro de 1.5 cm de lado y en trozos de 0.5 cm. La cabeza va soldada en el lado izquierdo del tubo cortado y roscado. Se hace una rosca en el extremo derecho de 1 mm de paso, y en una longitud de 2 cm a partir del extremo derecho.

Las placas se obtienen de otro bloque cuadrado de hierro de 8 cm de lado y en trozos de 2 cm de espesor.

Dos placas unidas mediante un tornillo

Fig. A.4.3

Todo lo anterior se ensambla para formar la pieza descrita.

El diagrama de proceso se indica en la figura A.4.4. Para una ampliación sobre estos diagramas véase Maynard (1963, cap. 2).

Fig. A.4.4

APÉNDICE CAPÍTULO 5

A.5.1 Diversos tipos de sistemas (Ackoff)

En lo que sigue daremos definiciones más precisas de estos conceptos. (Ackoff, 1971).

Ackoff distingue entre sistemas que *mantienen* estados y los que *buscan* metas.

Un *sistema que mantiene un estado* es uno que 1) puede reaccionar de sólo una manera a un evento interno o externo pero 2) reacciona de manera diferente a eventos diferentes internos o externos, y 3) estas diferentes reacciones producen el mismo estado (resultado) interno o externo. En estos sistemas las reacciones están completamente determinadas por los eventos causales, es decir, son de reacción y, por lo tanto, son completamente determinados. Sin embargo, poseen una función y es aquella de mantener el estado que produce. Este estado es generado de formas distintas ante diferentes condiciones. Tal es el caso del termostato, una brújula o un regulador de voltaje.

Un *sistema que busca una meta* es uno que responde en forma distinta a uno o más eventos diferentes externos o internos mediante uno o más estados diferentes externos o internos, y que puede responder distintamente a un evento específico, en un ambiente que no cambia, para producir un estado particular que es la meta.

Estos sistemas son responsivos (no reactivos) ya que tiene elección de respuestas, puede lograr el mismo fin de maneras diferentes: pueden escoger el comportamiento. Tiene memoria y puede incrementar su eficiencia a medida que pasa el tiempo para lograr la meta. Puede aprender y adaptarse. Los sistemas con pilotos automáticos y la “rata electrónica” que aprende a moverse en un laberinto para salir de él, son ejemplos de ellos. A la secuencia de los comportamientos que constituyen un sistema y tiene la función de producir una meta se le conoce con el nombre de *proceso*.

Un *sistema que busca múltiples metas* es un sistema que busca una meta en dos o más estados iniciales diferentes externos o internos y que busca metas diferentes en al menos dos estados diferentes, siendo la meta determinada por los estados iniciales. Estos sistemas pueden perseguir diferentes metas, pero

no determinan la meta a seguir; esta la determina el ambiente. Sin embargo escogen los medios mediante los cuales persiguen sus metas. Tal es el caso de un computador que juega diversos juegos. El juego a jugar lo decide el usuario, pero el computador escoge la forma para lograr ganarlo: la meta a lograr.

En un *sistema intencional* el propósito es interpretado por un observador. Es cuando un elemento ajeno al sistema, es decir que pertenece al ambiente, supone un propósito en el comportamiento observado. Podríamos recordar el ejemplo del ave que hace su nido para empollar sus huevos. Aunque realmente no hay un propósito, podría pensarse que la naturaleza a través de los mecanismos genéticos le impone una meta que cumplir.

En los *sistemas intencionados* se buscan múltiples metas en un ambiente que no cambia y pueden producir diferentes resultados en ambientes iguales o diferentes. Estos sistemas pueden modificar sus metas en ambientes que no cambian pudiendo seleccionar las metas así como los medios para lograrlas. En otras palabras tienen voluntad. La meta la define el mismo sistema. El caso más común es el ser humano.

Los sistemas intencionales son controlables y predecibles ya que sus propósitos son impuestos. En el caso de los intencionados, esto no es cierto. Estos últimos determinan tanto el *qué*, la meta a lograr, como el *cómo*, los medios para lograrla.

Estos aspectos son los que destaca Checkland en su metodología. Esta está dirigida, como bien sabemos, a sistemas de la actividad humana, sistemas intencionados.

Finalmente Checkland distingue entre *comportamiento intencional* e *intencionado*. En el primero, un observador ve un propósito; en el segundo el comportamiento es deseado, hay capacidad de decisión. Obviamente esta clasificación es relativa. Una acción que estemos realizando puede ser juzgada por otro como algo impuesto, pero al ahondar más en ella podría ser que comprendiera que era un verdadero deseo de quien la esté llevando a cabo.

Vale la pena incluir aquí un tipo de sistema que es muy importante para la comprensión de los sistemas abiertos: el sistema *adaptable*¹⁷⁷. Un sistema es adaptable si, cuando existe un cambio en el ambiente y/o en uno de sus estados internos que reduce su eficiencia para lograr una o más de sus metas que definen su(s) función(es), reacciona o responde cambiando su propio estado y/o

177. A menudo se usa el neologismo adaptativo.

el de su ambiente para aumentar su eficiencia con respecto a esa meta o metas. Por lo tanto, la adaptabilidad es la habilidad de un sistema para modificarse a sí mismo o al ambiente cuando alguno de ellos ha cambiado para desventaja del sistema con el fin de recuperar aunque sea parte de la eficiencia perdida. *Aprender* es aumentar la propia eficiencia en la búsqueda de una meta bajo condiciones cambiantes. En la naturaleza, el aprendizaje para mejorar la habilidad de cazar, es un fenómeno de adaptación: exige intentos repetidos para mejorar la eficiencia. Nótese que para lograr esto se requiere una habilidad para modificar el propio comportamiento (es decir, poseer escogencia) y memoria.

A.5.2 Leyes sistémicas y Ecuaciones diferenciales

Las ecuaciones diferenciales¹⁷⁸ son una de las herramientas más poderosas de que dispone la ciencia para describir sistemas dinámicos continuos, es decir, sistemas en los cuales los elementos que lo componen cambian con el tiempo en forma continua¹⁷⁹.

Recordemos que la expresión dx/dt significa la forma como una propiedad x , referida a un elemento dado, cambia con el tiempo. Tal es el caso del calor transferido de un cuerpo caliente al ambiente (la propiedad es el calor), la tasa de nacimiento de los individuos de una población (la propiedad es el número de individuos en cada momento), el agua vertida por una represa (la propiedad es el número de metros cúbicos).

Cuando son varios los elementos y diferentes las propiedades se establece un sistema de ecuaciones diferenciales. Para ello es necesario dar una definición de sistema. Retomaremos lo indicado por Bertalanffy, en el numeral 5.3.1. Un sistema S es un conjunto p de n elementos, $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ y un conjunto R de relaciones entre dichos elementos definidos por la expresión:

$$S = \{p, R\} \tag{A.5.1}$$

178. Ha servido como base: Bertalanffy (1973, p. 53-, 127-); Hall and Hagen (En Litterer, 1969, p. 31); Rapoport (En Litterer: 1969, p. 88).

179. Existe la matemática equivalente para los sistemas discretos y se conoce con el nombre de *ecuaciones de diferencia*.

De acuerdo con esta definición, si en un sistema se cambian los elementos o las relaciones, el sistema cambia, lo cual está de acuerdo con la definición que hemos dado en el capítulo 2.

Un sistema S puede ser descrito por un sistema simultáneo de ecuaciones diferenciales ordinarias. Sea x_i una medida del elemento p_i , $i=1, 2, 3, \dots, n$. Para un conjunto finito de elementos el sistema puede definirse como:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= f_1 (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ dx_i / dt &= f_i (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ &\dots\dots\dots \\ dx_n / dt &= f_n (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{aligned} \tag{A.5.2}$$

El *estado de un sistema* se define unívocamente por un conjunto de n números, mediciones de las n propiedades. El conjunto de todos los puntos n -dimensionales se conoce con el nombre de *espacio de fase*. El comportamiento del sistema es descrito por las trayectorias posibles en el espacio de fase, es decir, por la sucesión de estados por los cuales el sistema pasa. Para el caso de dos propiedades (dos variables) el espacio de fase generalmente es el plano Euclidiano y las trayectorias posibles serán curvas en el mismo.

Por ejemplo, si se trata de una población en la cual la propiedad es el número de individuos n y queremos estudiar cómo varía dicha población en el tiempo, tal como lo vimos en el numeral 5.3.1 tendremos la ecuación diferencial:

$$dx/dt = f(x) = kx \tag{A.5.3}$$

El espacio de fase para este ejemplo es la figura 5.6 del capítulo 5, para $k = 0.02$ y una población inicial de $x_0 = 10000$.

Veamos algunas de las leyes sistémicas bajo esta perspectiva matemática (Cfr. cap. 4).

A.5.2.1 Totalidad

Desarrollemos cada una de las ecuaciones del sistema (A.5.2) por medio de una serie de Taylor. Tendremos:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots a_{ij}x_j + \dots + a_{in}x_n + a_{i11}x_1^2 + \dots, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{A.5.4})$$

Como se ve, cualquier cambio en la propiedad x_i afecta a gran parte o a todo el sistema y a su vez, un cambio en cualquiera otra propiedad x_j , $j \neq i$, puede afectar a x_i (afecta a la tasa de cambio de x_i). El sistema se comporta como un todo en el cual un cambio en un elemento puede depender y afectar a todos los demás.

Si hacemos que todos los valores de los coeficientes que afectan a las propiedades x_j , $j \neq i$, sean cero, entonces tendremos el sistema:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_i + a_{i11}x_i^2 + a_{i111}x_i^3 + \dots i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.5.5})$$

Aquí los cambios en el elemento i sólo dependen del mismo elemento, por lo que cada elemento es independiente de los demás. Las variaciones del todo, es la suma de las variaciones de sus componentes. Es el “no sistema”. Tal cosa ocurre, por ejemplo, con los latidos del corazón donde su comportamiento puede ser estudiado sin necesidad de considerar todo el sistema.

Esto nos permite enfatizar en que la Teoría General de Sistemas es un complemento para comprender el mundo, y jamás ha reclamado ser el único camino para conocer sus fenómenos.

A.5.2.2 Segregación (mecanización) progresiva.

Es el caso cuando en un sistema sus partes se van especializando cada vez más, alejándose de la propiedad de ser un todo.

Diferente a lo que ocurre en el mundo físico (por ejemplo los átomos, las moléculas o los cristales cuya organización resulta de la unión de partes pre-existentes) en el mundo de la organización de un todo biológico, éste resulta

de la diferenciación de un todo original que se segregó en partes. Tal es el caso del desarrollo de un embrión que, de un todo único, equipotencial en sus comienzos, evoluciona a un ser que posee órganos independientes, con funciones específicas. Lo mismo ocurre en la evolución del sistema nervioso, o en las sociedades en las cuales, inicialmente, quienes la conforman no tienen funciones perfectamente delimitadas pero con el paso del tiempo las van especializando. Este proceso tiene como resultado un aumento en la complejidad del sistema, es decir, en la diversidad de funciones que este puede ejecutar, a diferencia de cuando era una sola entidad. La especialización progresiva es la que permite que en los seres vivos, surgidos de una única célula que se auto reproduce en células idénticas, con el paso del tiempo éstas se especialicen formando órganos diferentes, con funciones específicas: corazón, riñones, tejidos diversos, cerebro...

Matemáticamente esto se refleja cuando, en el transcurso del tiempo, gran parte de los coeficientes a_{ij} de x_i , $i \neq j$, tienden a cero a medida que el tiempo pasa. En el caso extremo tenemos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} a_{ij} = 0, i \neq j \quad (\text{A.5.6})$$

Cuando la ecuación (A.5.6) se cumple para todo i y todo j tenemos un conjunto de elementos completamente independientes.

Como ya dijimos, la segregación permite una mayor complejidad del sistema, debido a la especialización de sus componentes, pero el sistema pierde gran parte de la propiedad de ser un todo, que es lo que le permite enfrentar con éxito los efectos adversos del ambiente: una parte puede reemplazar fácilmente a cualquier otra ya que todas hacen prácticamente lo mismo. Además, la regulación del sistema es cada vez más débil y el sistema es cada vez más similar a un mecanismo. Para mantener su característica de sistema, es necesaria la centralización: un elemento o grupo de elementos que coordinen a las partes que surgen por segregación.

A.5.2.3 Centralización

La dominación de una de las partes sobre el todo puede representarse matemáticamente, considerando que, para un elemento cuya propiedad es x_c , los

coeficientes que lo relacionan con los demás elementos (los a_{ic} , $i = 1, 2, \dots, n$) son grandes en todas las ecuaciones mientras que los coeficientes de los otros elementos son considerablemente más pequeños o incluso iguales a cero. El siguiente sistema de ecuaciones define la tendencia a la centralización (por simplicidad sólo se han escrito los términos lineales):

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= a_{11}x_1 + \dots + a_{1c}x_c + \dots + a_{1n}x_n \\ &\vdots \\ dx_c / dt &= a_{cc}x_1 \\ &\vdots \\ dx_n / dt &= a_{n1}x_1 + \dots + a_{nc}x_c + \dots + a_{nn}x_n \end{aligned} \quad (\text{A.5.7})$$

Un pequeño cambio en x_c causará un cambio grande en todo el sistema. Este elemento es un “líder”, el elemento que ejerce una gran influencia en todos los subsistemas. Se le denomina “disparador” (trigger).

La centralización progresiva se mezcla con la segregación progresiva con el fin de aumentar la complejidad sin perder completamente la propiedad de la globalidad, es decir, a pesar de la “mecanización” se conserva el sistema.

A.5.2.4 Jerarquización

Consideremos el caso en el cual algunas (o todas) de las partes p_i de un sistema, están compuestas a su vez por otras partes q_{ij} con propiedades y_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$). Para cada uno de estos casos podemos establecer la relación de dependencia:

$$dy_{ii} / dt = f(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}) \quad (\text{A.5.8})$$

Esta superposición de sistemas se denomina *orden* jerárquico. Para cada uno de estos subsistemas, los conceptos de totalidad, mecanización, centralización, finalidad etc, también son aplicables.

A.5.2.5 Sistema cerrado, abierto, autoorganización, equifinalidad

En un sistema de reacciones químicas en el cual la tasa de cambio de las concentraciones de cada una de las sustancias involucradas es una función lineal de las concentraciones de todas las sustancias, es posible describir su comportamiento mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$dx_i/dt = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + b_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.5.9})$$

en donde x_i es la concentración de la i -ésima sustancia, y a_{ij} es el efecto de la sustancia j en la tasa de cambio de la sustancia i . El efecto es facilitador si a_{ij} es positiva, e inhibitorio, si es negativa. La constante b_i representa una fuente externa de la i -ésima sustancia si es positiva, y un sumidero si es negativa. Esta ecuación es más general que la ecuación (A.5.2) ya que incluye al ambiente.

Si todos los valores de b_i son iguales a cero, tendremos un sistema aislado. El sistema estará en un estado de equilibrio si todas las dx_i/dt son iguales a cero. Tendremos, entonces, que el sistema (A.5.9) será uno de ecuaciones lineales homogéneas, a partir del cual es posible obtener los valores de x_i de las concentraciones que garantizan tal estado. En este caso la única solución posible es la solución trivial $x_i = 0$. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta dos condiciones adicionales: primero, que de acuerdo con la ley de la conservación de la materia, la suma total de las masas debe ser la misma, o en términos matemáticos:

$$\sum_{i=1}^n dx_i/dt = 0, \forall i \quad (\text{A.5.10})$$

En este caso, el nuevo sistema tendrá sólo $n-1$ ecuaciones independientes, por lo que las soluciones serán infinitas. Es necesario, entonces, imponer una segunda condición, como por ejemplo, para el caso aislado, considerar que la suma de las concentraciones se conserva (es igual a una constante C):

$$\sum_{i=1}^n x_i = C, \forall i \quad (\text{A.5.11})$$

El estado estable (estado de equilibrio) dependerá ahora de C y no todos los b_i serán iguales a cero.

Consideremos ahora al sistema abierto, es decir, con fuentes y sumideros. En este caso no todos los b_i son nulos. El sistema puede tener un estado estable, *que no depende de las concentraciones iniciales*. Si se cambian dichas concentraciones, el sistema tenderá al mismo estado estable tan pronto se deje de influir en el. Este estado dependerá sólo de los valores de a_{ij} y no de los b_i . En otras palabras dependerá sólo de las relaciones (los a_{ij} , y del ambiente, los valores de b_i). El sistema es equifinal. El sistema se autoorganiza.

Consideremos ahora un caso más complejo, en el cual las variables entre sí interactúan, además de las otras características indicadas en la ecuación (A.5.9). Este sistema se expresa mediante el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$dx_i/dt = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{jk}^i x_j x_k - \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j + C, i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{A.5.12})$$

Aquí las reacciones químicas ocurren como consecuencia de las colisiones entre moléculas de las diferentes sustancias involucradas (son los términos $x_j x_k$). Esta ecuación es isomorfa con varios tipos de fenómenos, como por ejemplo la relación predador-presa indicado por la ecuación (III-7) del capítulo 3. Se invita al lector a que desarrolle la equivalencia, teniendo en cuenta que $n = 2$. El modelo también permite describir el proceso de reproducción debido a los encuentros de miembros de sexos opuestos, de la misma especie.

Incluso se puede pensar en la posibilidad de modelar una población humana dividida en grupos, cada uno de ellos caracterizado por patrones complejos de opiniones o creencias (religiosas, políticas...). Los contactos entre miembros pueden resultar en aceptaciones o modificaciones de los patrones descritos, generando crecimiento o decrecimiento de las subpoblaciones consideradas.

A.5.3 La propuesta de O. Lange

Recordemos que el elemento activo se define como una caja negra con entradas, salidas y relaciones entre ellas (figura A.5.1).

Existe, pues, una relación que se puede medir entre los estados de entrada y los de salida del elemento activo E_r mediante una transformación $T^{(r)}$. Podemos escribir, como relación válida para la figura A.5.1:

Elemento activo

Fig. A.5.1

$$\mathbf{Y}^{(r)} = \mathbf{T}^{(r)}(\mathbf{X}^{(r)}) \quad (\text{A.5.13})$$

Para calcular la transformación $T^{(r)}$, se analiza cómo un cambio en el valor de la componente j del vector $\mathbf{X}^{(r)}$, que designaremos como Δx_j^r afecta a la componente i del vector $\mathbf{Y}^{(r)}$, sin que se modifiquen las otras componentes. Se define la expresión:

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta y_i^r}{\Delta x_j^r}, \Delta x_k^r = 0, k \neq j, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (\text{A.5.14})$$

Estos coeficientes de efectos parciales formarán una matriz de n renglones y m columnas, la cual se denotará por $\mathbf{A}$. Por lo tanto:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5.15})$$

La transformación toma la forma:

$$\Delta y = \mathbf{A} \Delta x \quad (\text{A.5.16})$$

La matriz de transformación A puede ser una matriz de coeficientes lineales, de coeficientes no lineales o de coeficientes continuos, es decir, expresa la transformación mediante un sistema de ecuaciones lineales, de funciones o de ecuaciones diferenciales.

Es posible establecer acoplamientos entre elementos activos, de tal manera que algunas de, o todas las salidas de uno de ellos, se acople a algunas (o todas) las entradas del otro. Incluso, un elemento activo puede influir en otro elemento que le antecede formando un lazo de retroalimentación.

Para ello se define una matriz de acoplamientos entre componentes (salidas y entradas), matriz compuesta de ceros y unos, según que una componente de la salida de un elemento activo E_r , se convierta en la componente de una entrada de otro elemento activo E_s . La figura A.5.2 ilustra este hecho.

Acoplamiento de elementos activos

Fig. A.5.2

Nótese que no todas las salidas de E_r se convierten necesariamente en entradas de E_s . Esta “matriz de acoplamiento” (que será cuadrada y tendrá como número de filas el máximo número de componentes de los vectores de entrada de E_s o de salida de E_r .) se designará por C_{rs} .

Las relaciones entre las salidas de E_r y las entradas de E_s se expresan mediante la ecuación:

$$\mathbf{X}^{(s)} = \mathbf{C}_{rs} \mathbf{Y}^{(r)} \quad (\text{A.5.17})$$

Cuando un elemento activo no se conecta con otro, por ejemplo el elemento E_j no se conecta con el elemento E_k , entonces C_{ik} es igual a la matriz nula (una

matriz cuyas componentes son todas cero). Con esta convención cualquier sistema, con un número finito de elementos, se podrá representar, con respecto a sus acoples mediante una matriz S (A.5.18), que denominaremos “matriz estructural del sistema”, siendo N el número de elementos activos del sistema en cuestión. Por definición de elemento activo, $C_{ii} = 0$.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1N} \\ C_{21} & 0 & C_{23} & \cdots & C_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{N3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5.18})$$

Definiendo al *vector de estados de entrada* $\mathbf{X} = (\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}^{(n)})$ y el *vector compuesto de estados de salida del sistema* $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}^{(1)}, \mathbf{Y}^{(2)}, \dots, \mathbf{Y}^{(n)})$ es posible demostrar que:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{T}\mathbf{S} \\ \mathbf{P} &= \mathbf{S}\mathbf{T} \end{aligned} \quad (\text{A.5.19})$$

en donde $R_{rs} = C_{rs}T_r$ y $P_{rs} = T_sC_{rs}$.

A partir de las consideraciones anteriores, es posible obtener, si los elementos activos son acoplados, el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \mathbf{T}\mathbf{S}(\mathbf{X}) \\ \mathbf{Y}' &= \mathbf{S}\mathbf{T}(\mathbf{Y}) \end{aligned} \quad (\text{A.5.20})$$

APÉNDICE CAPÍTULO 6

A.6.1 Tipos de energía y sus transformaciones

La energía se puede manifestar de diferentes maneras: por movimiento (cinética), por posición (potencial), por calor, por electricidad, por radiaciones electromagnéticas, por reacciones atómicas...

Lo anterior permite clasificar las energías en:

- Energía mecánica.
- Energía térmica.
- Energía eléctrica.
- Energía radiante.
- Energía química.
- Energía nuclear.

La energía está continuamente transformándose, de modos más útiles a menos útiles. La química, que se libera en la explosión de la dinamita se convierte parte en calor, parte en energía cinética al arrojar empaques y compuestos de la dinamita. Una parte del calor generado podría, eventualmente, transformarse en otro tipo de energía (por ejemplo, trabajo al deformar un cuerpo o partirlo en pedazos); el resto se disiparía. La energía cinética, al caer al suelo y perder movimiento las partes lanzadas, no puede ser recuperada en forma de energía potencial.

La degradación de la energía es común en todo tipo de proceso en la naturaleza. Así, la energía eléctrica se degrada en calor al pasar por una resistencia. La energía química se degrada en calor cuando produce combustión. La energía mecánica se degrada en calor por choque o rozamiento. Por esta razón se dice que la energía calórica es degradada: esta energía no puede recuperarse completamente para ser transformada de nuevo.

Lo anterior nos lleva a definir el concepto de *rendimiento energético* y se expresa como:

$$\text{energía útil/energía total}$$

Existe una cantidad inmensa de energía almacenada en todos los materiales. Einstein concluyó que la energía contenida en una masa m era igual a mc^2 , siendo c la velocidad de la luz.

Como las moléculas (y obviamente los átomos) viven en constante movimiento y, además, poseen energía potencial con respecto a las moléculas vecinas, es de esperar que ellas generen calor. ¿Por qué, entonces no se queman las hojas de los libros? Hewitt (2004, p. 343) explica que esta energía está almacenada como energía química, que es en realidad *energía potencial eléctrica a nivel molecular*, otra interesante forma de transformación de energía. Toda la energía almacenada en un cuerpo, es decir que se encuentra dentro de la sustancia del mismo, se denomina *energía interna*.

Finalmente, aclaremos que el calor es energía que se transfiere de un lugar a otro, por lo general por choques moleculares. El calor es energía en tránsito. De acuerdo con esto, la primera ley de la termodinámica puede enunciarse de la siguiente manera:

Cuando el calor fluye hacia o desde un sistema, el sistema gana o pierde una cantidad de energía igual a la cantidad de calor transferido.

“Por *sistema* se entiende un grupo bien definido de átomos, moléculas, partículas u objetos” (Hewitt *Op. Cit.*). Se debe poder definir, claramente, lo que hay dentro del sistema y lo que hay fuera de él. Esta diferenciación es fundamental para comprender cabalmente la primera ley de la termodinámica. Un sistema puede recibir, de “afuera”, es decir, del ambiente, energía calórica. Esta energía puede ser utilizada de dos maneras:

- Para aumentar la energía interna del sistema, si se queda en él, como cuando calentamos agua en una estufa.
- Para efectuar trabajo sobre elementos fuera del sistema, como utilizar el vapor para mover una rueda.

Por esta razón, otra forma de expresar la primera ley es:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (\text{A.6.1})$$

en donde ΔQ es el calor agregado al sistema, ΔU es el incremento de energía interna y ΔW el trabajo efectuado por el sistema sobre el ambiente. Los dos

procesos se pueden efectuar simultáneamente. En tal caso el aumento de energía interna debe ser inferior al que tendría el sistema si no realizara trabajo. Para el cálculo de la ecuación, la energía que entra es positiva y el trabajo que sale es positivo.

No hay manera de que la salida de energía sea mayor que la entrada de energía:

la energía del sistema + la del ambiente es constante.

Si lo que se le agrega al sistema es trabajo, entonces la energía interna deberá aumentar: es el calentamiento que sufren los metales cuando son taladrados. Para comprender cómo se distingue la energía de trabajo de otro tipo de energía, podemos hacer la analogía de que ella puede gastarse completamente subiendo pesas o comprimiendo resortes.

Recordemos que en el numeral 3.6 se indicó que calor y trabajo son las dos únicas formas de energía en las cuales el intercambio energético no incluye transferencia de materia.

A lo largo de este texto a la energía se le han dado cualidades como energía degradada, energía inútil...

Roldán (2014) dice que esta manera antropomórfica de referirse a la energía, no es conveniente para un tratamiento científico del tema. Dos conceptos permiten establecer un vocabulario más preciso. Para ello rige la ecuación: energía = exergía + anergía.

La definición de energía como capacidad de realizar trabajo tiene la dualidad de que, siendo el trabajo un tipo de energía estaríamos diciendo que "la energía es la capacidad de transformarse en energía".

La energía se presenta en diversas formas, como ya se indicó. Sin embargo no todas las transformaciones permitidas por la segunda ley, suceden. La energía eléctrica puede *en principio* transformarse totalmente en trabajo. En cambio la energía calórica no puede *ni en principio*, transformarse totalmente en trabajo.

Para establecer una diferencia cualitativa se han introducido los conceptos de exergía y anergía.

La definición de exergía es: "la máxima cantidad de energía que *en principio* puede transformarse en trabajo en unas circunstancias dadas; por ello Dincer y Cengel afirman que no es una propiedad termodinámica sino más bien una

copropiedad del sistema y su ambiente”. Aquella energía, que en principio no pueda convertirse en trabajo, se denomina *anergía*.

Cuando decimos que todo el trabajo puede convertirse en calor, aunque en la realidad no se dé, en principio sí. Diremos que la fuente de energía está compuesta sólo de *exergía*. Cuando decimos que no todo el calor puede convertirse en trabajo, ni siquiera en principio (o como se dice comúnmente, en teoría), entonces hablaremos de *anergía*.

Para el caso de la máquina térmica, una parte del calor se puede convertir en trabajo, por lo tanto hablaremos de *exergía*; la parte que no puede hacerlo la denominaremos *anergía*. Por lo tanto, cuando crece la entropía, disminuye la *exergía*, aumentando la *anergía*.

Finalmente podemos entonces decir que la *exergía* es la capacidad de realizar trabajo. La frase común “consumo de energía” y “conservación de energía”, se debe cambiar por “consumo de *exergía*”, y “conservación de *anergía*”. En los procesos naturales e industriales aumenta la *anergía* y disminuye la *exergía*.

A.6.2 Ley de Fourier: propagación del calor

Cuando dos sustancias se encuentran a diferentes temperaturas, los experimentos muestran que hay una distribución continua de temperatura entre ellas (Halliday & Resnick, 1963, p. 471-). La transferencia de energía que resulta de la diferencia de temperaturas entre partes adyacentes se denomina *conducción de calor*.

Consideremos una lámina de material de sección transversal de área A y espesor Δx , cuyas caras están a temperaturas diferentes. Podemos medir el calor Q que fluye perpendicularmente a sus caras, desde la temperatura más alta (T_a) a la más baja (T_b), durante un tiempo t (ver figura A.6.1).

Los experimentos demuestran que Q es proporcional al tiempo t y al área A para una diferencia de temperatura ΔT y que Q es proporcional a $\Delta T/\Delta x$ para un tiempo t y un área A dados, siempre y cuando tanto ΔT como Δx sean pequeños.

Flujo de calor en una lámina de espesor Δx

Fig. A.6.1

Por lo tanto:

$$Q/t \propto A\Delta T/\Delta x \quad (\text{A.6.2})$$

En el límite, para una lámina de espesor infinitesimal dx , a través de la cual hay una diferencia de temperatura dT , es posible establecer la ley fundamental de la conducción de calor:

$$dQ/dt = -kAdT/dx \quad (\text{A.6.3})$$

Aquí dQ/dt es la tasa por unidad de tiempo de la transferencia de calor, dT/dx se denomina el *gradiente de temperatura*, y k es una constante de proporcionalidad llamada *conductividad térmica*. Se escoge la dirección del flujo de calor en la dirección en la cual x aumenta. Como el calor fluye en la dirección en la cual decrece T , introducimos un signo negativo en la ecuación anterior, es decir, dQ/dt es positivo cuando dT/dx es negativo.

Una sustancia con un valor de k grande es buena conductora de calor. Si k es pequeño, es buena aislante.

Retomemos el análisis hecho con base en la figura 6.3. Una barra metálica aislada, de área A , colocada entre dos fuentes de calor de temperaturas diferentes alcanza su estado estable (ver figura A.6.2).

Conducción de calor a través de una barra aislada

Fig. A.6.2

Aplicando la ecuación de la conducción de calor, tendremos que la expresión dQ/dt es la misma a lo largo de cualquier sección de la barra. De acuerdo con dicha ecuación, como k y A son constantes, entonces el gradiente de temperatura dT/dx será el mismo a lo largo de todas las secciones de la barra. Por lo tanto T decrece linealmente a lo largo de la barra y $dT/dx = (T_b - T_a)/L$. Entonces, el calor transferido Q en el tiempo t está dado por:

$$Q/t = -kA(T_b - T_a)/L \quad (\text{A.6.4})$$

El fenómeno de la conducción de calor nos muestra claramente que el concepto de calor y temperatura, aunque relacionados, son muy diferentes. El flujo de calor a lo largo de una barra no es lo mismo que la diferencia de temperatura entre sus extremos. Diferentes barras, con la misma diferencia de temperatura, pueden transferir cantidades muy diferentes de calor, en el mismo tiempo. Como se dijo en el texto que referenció este literal, se enfrentan nuevas propiedades a viejas ideas fuertemente establecidas: gravitación y calor.

A.6.3 Termodinámica reversible

Debemos definir primero dos conceptos: propiedades intensivas y propiedades extensivas.

Una propiedad es *intensiva* si ella es independiente del tamaño o extensión del sistema, como ocurre con la fuerza. La propiedad es *extensiva* si depende del

tamaño o extensión del sistema, como en los desplazamientos. Las propiedades extensivas se suman (longitud, masa, volumen...¹⁸⁰).

Las propiedades extensivas toman valores bien definidos en cada punto del sistema: su manifestación es un promedio de acciones individuales, como es el caso de la presión y la temperatura.

La ecuación que define el trabajo de un sistema es:

$$\begin{aligned} dW &= Fdx \\ \text{o} \\ W &= \int Fdx \end{aligned} \tag{A.6.5}$$

siendo F la fuerza y x el desplazamiento.

Esta ecuación relaciona dos tipos de propiedades diferentes: una intensiva y una extensiva.

Sólo cuando las propiedades intensivas y extensivas pueden expresarse como funciones continuas unas de otras, se puede utilizar el cálculo infinitesimal; tal es el caso al calcular W mediante la integral descrita en A.6.5. Y esto sólo es posible cuando las propiedades de los estados del sistema son uniformes e invariantes en el tiempo, como ocurre con la presión y el volumen de un gas. En estos casos, se dice que los *estados están en equilibrio*. La ecuación que define a W sólo es aplicable si el trabajo se realiza a través de una cadena sucesiva de estados de equilibrio. Estos procesos se llaman *reversibles* o casi estáticos. En estos procesos las propiedades del sistema están siempre en o infinitesimalmente cercanas a sus valores de equilibrio. Una mínima diferencia en una de las propiedades puede incrementar o devolver el proceso, sin alterar el equilibrio del sistema.

A.6.4 El ciclo de Carnot

Es un ciclo teórico, propuesto en 1824 por Sadi Carnot. Este ciclo determina los límites bajo los cuales se puede convertir el calor en trabajo. Consideremos

180. Recordemos el concepto de *propiedad fundamental*.

un cilindro aislado por todas partes, menos en su base, que contiene un gas ideal, el cual se caracteriza por su presión, volumen y temperatura (p, V, T)¹⁸¹. El proceso completo se realiza a través de dos procesos isotérmicos (a temperatura constante) y dos procesos adiabáticos (sin intercambio de calor con el entorno), ambos reversibles. El ambiente de este sistema está formado por dos recipientes calóricos, de gran capacidad calórica, a temperaturas T_1 y T_2 , tales que $T_1 > T_2$ y dos bases no conductoras de calor. El ciclo se realiza en cuatro etapas tal como lo ilustra la figura A.6.3 (Halliday & Resnick, *Op. Cit.*, p. 534-).

Máquina bajo el ciclo de Carnot

Fig. A.6.3

El dibujo (1) de la figura A.6.3 representa el sistema en el estado (p_1, V_1, T_1). Éste absorbe una cantidad de calor Q_1 de un recipiente calórico que se encuentra a la temperatura T_1 . El calor transferido del recipiente de temperatura T_1 hace que el gas se expanda y alcance un volumen V_2 a la temperatura T_1 ; la presión disminuye a un valor p_2 . Es el dibujo (2), de valores p_2, V_2, T_1 . Ahora el gas es retirado de la fuente de calor de temperatura T_1 y depositado en una base aislada; la expansión continúa, siendo una expansión adiabática ya que no entra ni sale calor del sistema. Se alcanza el estado p_3, V_3, T_2 ; dibujo (3) de la figura (A.6.3). Durante este proceso, el cambio de volumen produce trabajo al hacer ascender el pistón; este consumo de energía hace que la temperatura descienda a T_2 .

Se pone el cilindro sobre el recipiente calórico de temperatura T_2 (menor que T_1), y el gas es comprimido lentamente hasta alcanzar el estado (p_4, V_4, T_2)

181. Debemos recordar que la temperatura de un gas es directamente proporcional al total de la energía cinética translacional de sus moléculas.

(dibujo (4)). Durante este proceso una cantidad de calor Q_2 es cedido por el sistema al recipiente calórico. La compresión es isotérmica a la temperatura T_2 y se realiza trabajo sobre el gas, por el pistón.

De nuevo se pone el cilindro en una base no conductora y el gas se comprime aún más hasta alcanzar la condición inicial (p_1, V_1, T_1) . Como durante esta parte del proceso ni entra ni sale calor del sistema, la compresión es adiabática. Se realiza trabajo sobre el gas y su temperatura se eleva a T_1 . El aumento neto de calor recibido por el sistema durante este ciclo es $Q_1 - Q_2$. El ciclo se describe mediante el siguiente diagrama $p - V$, indicado en la figura A.6.4 para un gas ideal.

Ciclo de Carnot

Fig. A.6.4

Los puntos a, b, c, d de esta figura corresponden a los estados descritos por los numerales (1), (2), (3) y (4) de la figura A.6.3.

El trabajo realizado por el sistema es el área dentro de las cuatro curvas indicadas. Es equivalente a:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (\text{A.6.6})$$

El rendimiento de esta máquina es dado por la expresión:

$$e = 1 - T_2/T_1$$

que es mayor a la de cualquier otra máquina que funcione cíclicamente entre estas dos temperaturas.

A.6.5 Entropía e irreversibilidad

Es posible demostrar a partir del ciclo de Carnot, que cuando hay intercambio de calor bajo un proceso isotérmico entre dos procesos adiabáticos (literal A.6.4), la siguiente ecuación se cumple: $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$. Recordemos que Q_1 es el calor absorbido por el sistema en un proceso isotérmico a temperatura T_1 ; Q_2 es el cedido por el sistema en un proceso isotérmico a temperatura T_2 . Recordando que el calor absorbido es positivo y el cedido negativo, la ecuación se escribirá: $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$.

Cualquier ciclo reversible, es posible considerarlo como una sucesión de ciclos de Carnot convenientemente dispuestos. Tales ciclos cumplen con la relación:

$$\oint dQ/dT = 0 \quad (\text{A.6.7})$$

El sistema absorbe una cantidad infinitesimal de calor (dQ) a la temperatura absoluta T . El cálculo de la integral sólo depende de los estados 1 y 2 y no de las trayectorias seguidas. Por lo tanto, dQ/dT es una propiedad del sistema, como lo es la energía interna. Esta propiedad se llama *entropía* del sistema y se designa por S . Si S_1 es la entropía del estado 1, y S_2 es la entropía del estado 2, entonces:

$$S_1 - S_2 = \int_1^2 dQ / dt \quad (\text{A.6.8})$$

que es la diferencia en entropía cuando se va del estado 1 al estado 2 a lo largo de una trayectoria reversible. Para un segmento infinitesimal de una trayectoria reversible: $dS = dQ/T$ es el cambio infinitesimal en entropía. Cuando se analiza un sistema desde el punto de vista de la entropía, es el cambio de ésta lo que realmente tiene significado.

De todo lo anterior se concluye que el cambio de entropía en un ciclo reversible es cero. Se dice que la entropía es una medida de la capacidad de realizar trabajo de un sistema. Veamos porqué.

Consideremos la expansión libre de un gas aislado (figura A.6.5).

Expansión libre

Fig. A.6.5.

El gas, confinado en una parte del recipiente, se expande hacia el vacío cuando la válvula se abre. El recipiente es rígido y está aislado. No se ejerce trabajo sobre el gas ni existe transferencia de calor. Por la primera ley de la termodinámica ($dU = dQ - dW$), no hay cambio de energía interna en el sistema ya que $dQ = dW$, y como conclusión $dU = 0$.

En el caso de un gas ideal, U sólo depende de su temperatura por lo que tampoco hay cambio en T .

Sin embargo, para volver el gas a su estado original, se requiere realizar trabajo para comprimirlo. Por lo tanto, debido al proceso de expansión, el gas ha perdido parte de su capacidad de realizar trabajo. Este proceso de expansión es un proceso irreversible. Más sobre el tema en A.6.7.

A.6.6 Cálculo del máximo valor de la entropía

Se trata de hallar los valores de p_i que maximicen la función de entropía, con la condición que las probabilidades totales sumen 1.

$$\begin{aligned} \text{Max } S &= k \sum_i p_i \ln(p_i) \\ \sum_i p_i &= 1 \end{aligned} \quad (\text{A.6.9})$$

Utilizando los multiplicadores de Lagrange, tenemos la siguiente función z a maximizar:

$$\text{Max } z = -k \sum_i p_i \ln(p_i) - \lambda (\sum_i p_i - 1) \quad (\text{A.6.10})$$

Para facilitar el análisis consideremos el caso para $i=3$.

$$\text{Max } z = -k [p_1 \ln(p_1) + p_2 \ln(p_2) + p_3 \ln(p_3)] - \lambda [p_1 + p_2 + p_3 - 1] \quad (\text{A.6.11})$$

De acuerdo con Lagrange:

$$\begin{aligned} \partial z / \partial p_1 &= -k [p_1 \partial \ln(p_1) / \partial p_1 + \ln(p_1)] - \lambda = 0 \\ \partial z / \partial p_2 &= -k [p_2 \partial \ln(p_2) / \partial p_2 + \ln(p_2)] - \lambda = 0 \\ \partial z / \partial p_3 &= -k [p_3 \partial \ln(p_3) / \partial p_3 + \ln(p_3)] - \lambda = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6.12})$$

Sabemos que $\partial \ln(p_i) / \partial p_i = 1/p_i$, por lo tanto:

$$\begin{aligned} \partial z / p_1 &= -k [p_1 (1/p_1) + \ln(p_1)] - \lambda = 0 \\ \partial z / p_2 &= -k [p_2 (1/p_2) + \ln(p_2)] - \lambda = 0 \\ \partial z / p_3 &= -k [p_3 (1/p_3) + \ln(p_3)] - \lambda = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6.13})$$

De esto resulta el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \ln(p_1) + (\lambda + k) &= 0 \\ \ln(p_2) + (\lambda + k) &= 0 \\ \ln(p_3) + (\lambda + k) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6.14})$$

Podemos deducir que: $\ln(p_1) = \ln(p_2) = \ln(p_3)$ y por lo tanto el máximo se encuentra cuando:

$$p_1 = p_2 = p_3 = 1/3 \quad (\text{A.6.15})$$

En forma general, la entropía alcanza su máximo valor cuando las probabilidades son todas iguales a $1/n$, siendo n el número de estados del sistema.

A.6.7 ¿El mundo es ordenado o desordenado?

Podríamos modificar la pregunta: ¿es mejor concebir el mundo como ordenado o como desordenado? Es evidente que pensar que en el mundo existe cierto orden, nos permite concebir opciones de explicación del mismo. De otra manera, no sería posible establecer regularidades (leyes) que permitieran simplificar su complejidad.

Desde un punto de vista religioso, un Dios tendría que haber creado un universo cada vez más ordenado. Pero si miramos este problema desde el punto de vista de la física nos encontramos con una situación muy diferente. Se dice que la entropía en el universo crece y que, a su vez, ésta es una medida de desorden. Por lo tanto, el desorden en el universo debe aumentar.

Hemos dicho que la entropía mide la pérdida de capacidad de convertir todo el calor en trabajo de un sistema debido a que cierta cantidad de energía calórica se disipa y no es recuperable en ninguna forma de energía útil. Por su parte, el desorden es una medida de nuestra ignorancia respecto a cómo medir las diversas variables de un sistema. Desorden significa total ignorancia.

La entropía de un sistema puede alterarse importando energía o información del ambiente que lo rodea. Sin embargo, la entropía del sistema, más la del ambiente, crecerá. Esto se debe a que la energía consumida o la información generada producen calor y el balance final es a favor del crecimiento de la entropía.

Como puede deducirse, este tema está íntimamente relacionado con el problema de la reversibilidad de las leyes físicas. Volvamos al ejemplo del gas confinado en un recipiente dividido por una pared que posee una trampa.

Supongamos que inicialmente en la sección izquierda se encuentra un gas de color azul (sus moléculas son azules). Al otro lado se encuentra un gas, en la misma cantidad que el azul, de color transparente (digamos “blanco” para fijar ideas). Al abrir la trampa, poco a poco los dos gases se mezclan produciendo un gas de color azul claro. Esto se debe a que las moléculas chocan unas con otras en forma aleatoria. Si esperáramos cierto tiempo jamás pensaríamos que los gases pudieran de nuevo, fruto de su movimiento molecular, volver a su estado inicial. El proceso es, pues, irreversible.

Sin embargo, como comenta Feynman (2010, p. 124-) si ampliáramos una sección cualquiera del gas, observando sólo algunas de las moléculas, su comportamiento sería reversible. Si al filmar esta sección pasamos la película al derecho o al revés, sólo veríamos choque de moléculas obedeciendo las leyes de la física. Nada podría indicar que uno de los procesos observados es imposible. Bajo mediciones precisas, el proceso es reversible. Sin embargo, al considerar millones de moléculas, la película en la cual ellas empiezan a diferenciarse entre azules en un lado del recipiente y blancas en el otro sería considerada la filmación pasada al revés. Feynman dice que “al final la irreversibilidad no es más que el resultado de los accidentes generales de la vida (p. 125)”. El evento es posible que ocurra, pero es improbable. Si el experimento se realiza con pocas moléculas, sí es probable que se dé la separación entre moléculas “azules” y “blancas”.

[] Así pues, la aparente irreversibilidad de la naturaleza no surge de la irreversibilidad de las leyes fundamentales de la física, sino del hecho de que, si se parte de un sistema ordenado y se deja a merced de los accidentes de la naturaleza (las colisiones moleculares), el sistema cambia en un único sentido.

La cuestión siguiente es: ¿de dónde surge el orden en primera instancia? En otras palabras, ¿cómo es posible partir de un estado ordenado? La dificultad radica en que empezamos con un sistema ordenado y acabamos en el desorden. Nunca se llega a otro estado ordenado. Una de las reglas del mundo es que se pasa del orden al desorden.

Teniendo en cuenta que, de acuerdo a la física actual, a cada partícula material de masa m le está asociado un campo gravitacional de energía $-mc^2$ (es decir, el campo gravitatorio de la partícula tiene energía negativa), se puede concluir que en un universo en expansión, por efecto de la gravedad, se forman grupos de materia concentrada, y que están separados por grandes extensiones de vacío, una situación que está lejos del universo uniforme que predice el segundo principio de la termodinámica. “La gravedad atrae los objetos hasta juntarlos en grupos, creando más orden y reduciendo *al mismo tiempo* la entropía” (J. Gribbin, *Op. Cit.* p. 176). Prigogine ha tratado de explicar estos fenómenos a través de las estructuras disipativas.

En el mundo macro se observan fenómenos reversibles así como irreversibles. ¿Pero qué ocurre en el mundo de los átomos y de las moléculas?

Como se ha indicado en este texto, Boltzmann (también Maxwell) descubrieron que el aumento de entropía en los sistemas cerrados tiene una naturaleza basada en las probabilidades: hay una probabilidad no nula de que la entropía decrezca espontáneamente. Para el caso de los sistemas macroscópicos esta probabilidad es inmensamente pequeña. En el mundo micro estas violaciones efímeras de la segunda ley de la termodinámica son fácilmente observables. Tal es el caso del movimiento Browniano en el cual la energía de un baño térmico se convierte en energía potencial.

Poincaré escribía (1958, p. 98):

Vemos ante nuestros ojos cómo el movimiento es transformado en calor gracias a la fricción, y el calor reconvertirse en movimiento, y todo esto sin ninguna pérdida, ya que el movimiento dura para siempre. Esto contradice el principio de Carnot.

Desde un punto de vista práctico, se ha observado que algo similar ocurre en las células vivas con la transducción de las proteínas. Desde una perspectiva teórica, la formulación de una estadística termodinámica para trayectorias aleatorias y los llamados teoremas de la fluctuación han permitido una mejor comprensión de las propiedades estadísticas sobre el trabajo y el calor disipado en procesos de sistemas pequeños.

É. Roldán (2014) propone que si la irreversibilidad es un fenómeno de probabilidades, es posible medirla comparando la probabilidad de observar un proceso con la probabilidad de observar el proceso contrario. La herramienta es la divergencia de Kullback-Leibler de la teoría de la información, que mide cuán diferentes pueden ser dos distribuciones de probabilidad. Más interesante aún es que esta medida de irreversibilidad es proporcional al aumento de entropía durante el proceso. Esto recupera el hecho bien conocido de que ante un aumento macroscópico de la entropía (mucho mayor que la constante de Boltzmann) es prácticamente imposible observar una reversibilidad en el tiempo.

Más de un siglo después de la explicación del movimiento Browniano dado por Einstein, las fluctuaciones parecen permanecer como explicación crucial para entender cómo el mundo macroscópico emerge de la dinámica microscópica.

En uno de los experimentos se demuestra cómo la ruptura de la simetría puede ser explorada utilizando los teoremas de la fluctuación. Esto implica que tal ruptura es universal, es decir, no depende de la naturaleza física del sistema o del proceso que pudieran inducirla. Lo que aparece es un decrecimiento de entropía en un sistema aislado, lo que obligaría a reconsiderar algunos de los aspectos básicos de la segunda ley de la termodinámica.

Queda un gran camino para investigar.

A.6.8. Algunas ideas adicionales sobre conjuntos difusos

Como indicamos en el capítulo 4 numeral 4.3, un conjunto difuso es una aplicación de la función $m_a(x)$ en el intervalo $[0,1]$ ¹⁸². Si X es un conjunto universal de referencia, y A es un conjunto de X , tendremos que el conjunto difuso A se define como el par:

182. Algunas ideas son extractadas de Dubois & Prade.

$$A = \{(x, m_A(x)), x \in X\} \quad (\text{A.6.16})$$

A partir de la teoría de estos conjuntos es posible definir el concepto de *número difuso* lo cual permite realizar mediciones difusas. Supongamos que para cierto cálculo necesitamos un valor de 7.0; pero si se nos pregunta qué pasaría si el resultado obtenido fuera 6.9 o 7.1 tal vez esto no haría mucha diferencia. Presionando aún más el análisis podríamos preguntar si el número 6.8 serviría. Esto nos llevaría a proponer el número difuso 7 de acuerdo con la función $m_7(x)$ ilustrada en la figura A.6.6.

Número difuso 7

Fig. A.6.6

Para analizar las relaciones entre los diferentes elementos de un conjunto, la teoría ha definido operaciones para las llamadas *relaciones difusas*. Una relación difusa típica es: “x es de mucha más edad que y”.

Aclaremos primero el concepto de *producto cartesiano*. Sean dos conjuntos $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ y $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$. El producto cartesiano $A \times B$ se define como el conjunto resultante de todos los pares ordenados posibles entre los elementos de A y los de B:

$$A \times B = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), \dots, (a_2, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_n, b_m)\} \quad (\text{A.6.17})$$

Sean $X_1, X_2, \dots, X_n$, n universos. Una relación difusa n -aria R en $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, es un conjunto difuso en $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, con funciones de pertenencia $m_R: m_1 \times \dots \times m_n \rightarrow [0, 1]$ y puede ser representada por la expresión:

$$R = \sum_{m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n} m_R(x_1, x_n) / (x_1, x_n) \quad (\text{A.6.18})$$

Zadeh propone como ejemplo: si $X_1 = \{Tom, Dick\}$ y $X_2 = \{John, Jim\}$ entonces la relación de “parecidos” entre miembros de podría definirse como:

$$R = \frac{0.8}{(Tom, John)} + \frac{0.6}{(Tom, Jim)} + \frac{0.2}{(Dick, John)} + \frac{0.9}{(Dick, Jim)} \quad (\text{A.6.19})$$

También las *restricciones* caen bajo la consideración de esta teoría. Un buen símil es una maleta que se deja expandir. Decidir lo que cabe allí o no, no es un asunto “nítido”. A veces retirando un elemento se puede acomodar otro, permitiendo que la maleta quede un poco más voluminosa.

El concepto de *variable difusa* permite ampliar el dominio de aplicación de esta teoría. Volviendo a nuestro ejemplo de la maleta en la cual queremos llevar diversos objetos que tienen cierto grado de facilidad de ser acomodados, es posible asignar a cada objeto un “grado de facilidad” y decidir qué es lo más conveniente de llevar y qué no.

Todo esto lleva a la propuesta de una *lógica difusa* (o lógica polivalente). En la lógica tradicional, el hecho de que un elemento pertenezca o no a un conjunto, permite definir una serie de operadores lógicos los cuales a su vez establecen reglas precisas de razonamiento. De manera similar a la simbología de la lógica tradicional (lógica bivalente), en la lógica difusa es necesario definir un número mínimo de operadores lógicos: negación ($\sim$), disyunción ($\vee$) y conjunción ($\wedge$). Como existen varias formas de definir estos operadores, aquí se da la particularidad de proponer varias formas de lógica difusa. Esta ampliación de las reglas de razonamiento permite modelar de manera muy acertada el razonamiento humano. Por esta razón, hemos dicho que con esta nueva matemática, el modelado de ciertos sistemas complejos se ha facilitado enormemente.

Sólo como ilustración indicaremos algunas definiciones para la negación, la unión, la intersección y el complemento en conjuntos difusos.

Negación. La negación se refiere al valor de verdad de una proposición P : $\nu(P)$.

$$v(\sim P) = 1 - v(P) \quad (\text{A.6.20})$$

Unión e intersección. Zadeh ha propuesto la siguiente definición para la unión y la intersección de dos conjuntos difusos A y B :

$$\begin{aligned} \forall x \in X, m_{A \cup B}(x) &= \max(m_A(x), m_B(x)) \\ \forall x \in X, m_{A \cap B}(x) &= \min(m_A(x), m_B(x)) \end{aligned} \quad (\text{A.6.21})$$

en donde $m_{A \cup B}(x)$ y $m_{A \cap B}(x)$, son las funciones de pertenencia de $A \cap B$ y $A \cup B$, respectivamente. Para el caso de los conjuntos nítidos, esta definición coincide con la definición tradicional de unión e intersección.

Interpretamos la unión de A y B como el conjunto difuso más pequeño que contiene tanto a A como a B . La intersección es el conjunto difuso más grande que contiene a A y a B .

Debemos tener en cuenta que siempre que estemos hablando de conjuntos difusos, es necesario relacionarlos con la función de pertenencia, tal y como la definición lo sugiere.

Refiriéndonos al numeral 6.2 (cap. 6) para los conjuntos J y V (jóvenes y viejos respectivamente), tendremos que el grado de pertenencia de una persona de 30 años para ser joven o vieja es de:

$$\begin{aligned} m_{J \cup V}(x = 30) &= \max(m_J(x = 30), m_V(x = 30)) \\ &= \max(0.9, 0.1) = 0.9. \end{aligned} \quad (\text{A.6.22})$$

Por otra parte, el grado de pertenencia de una persona de 30 años, de ser joven y vieja al mismo tiempo será de:

$$\begin{aligned} m_{J \cap V}(x = 30) &= \min(m_J(x = 30), m_V(x = 30)) \\ &= \min(0.9, 0.1) = 0.1. \end{aligned} \quad (\text{A.6.23})$$

Ser joven y viejo a los 30 años tendría un grado de pertenencia de 0.1.

Existen otras formas de definir la unión y la intersección que no las indicaremos en este texto.

Complemento. En el numeral 6.2 vimos el complemento de Zadeh. Un concepto más general es el *complemento- λ* ($\bar{A}^\lambda$) de A :

$$m_{\bar{A}^\lambda}(x) = \frac{1 - m_A(x)}{1 + \lambda m_A(x)}, \quad \lambda \in (-1, \infty) \quad (\text{A.6.24})$$

También es posible hablar de *conjuntos posibilísticos* para los conjuntos difusos, así como se habla de *conjuntos probabilísticos* para los conjuntos nítidos.

El concepto de *variable lingüística* –una variable cuyo valor no es un número sino una palabra o frase– es otro elemento que amplía el marco de aplicación de esta teoría. Evidentemente, son valores menos precisos que los valores numéricos. De aquí que encuentren en los conjuntos difusos su natural definición. Decir “Juan es joven” es, obviamente, menos preciso que decir “Juan tiene 25 años”. El “rótulo” o identificador “joven” puede ser considerado como un *valor lingüístico* de la variable *edad* y que juega el mismo papel que el valor numérico “25”, pero en forma menos precisa y de hecho, menos informativa. Otros valores que podríamos proponer son: “extremadamente joven”, “menos joven”, “no muy joven”, etc., como contraste con valores numéricos tales como “15”, “35”, “42”, etc.

Las variables lingüísticas generan los *lenguajes* y las *gramáticas difusas*, que son los fundamentos para desarrollar los lenguajes computacionales (*algoritmos difusos*), los cuales permiten llevar al computador los conceptos de lo que pudiera denominarse en forma genérica, la *matemática difusa*.

Una herramienta muy valiosa de este tipo de tratamiento es la posibilidad de modelar los lenguajes naturales. Zadeh ha desarrollado un procedimiento que llama PRUF (Possibilistic Relational Universal Fuzzy) que permite tal modelado¹⁸³. En esta representación, frases como “Ricardo es alto” es traducida en términos de distribuciones de posibilidades de la variable “Alto(Ricardo)” que asocia a cada valor de la variable un número en el intervalo [0,1], que representa la posibilidad de que “Alto(Ricardo)” pueda tomar el valor en cuestión¹⁸⁴.

183. Evidentemente en la actualidad existen nuevos lenguajes difusos tales como Fuzzy Prolog y Fril por sólo citar dos.

184. Existen excelentes libros sobre el tema. Para un resumen corto ver C.A.Ossa, 2000, p. 217.

APÉNDICE CAPÍTULO 7 y 8

A.7.1 Complementos a la Teoría del caos

Definición del concepto de caos. Desde un punto de vista matemático, el caos se define de la siguiente manera (Conde, 2014).

Una función f es caótica en D si cumple con las siguientes tres condiciones:

- El conjunto de puntos periódicos de f forman un conjunto denso.
- ii) f es topológicamente transitiva en D .
- iii) f es sensible a las condiciones iniciales en D .

Conjunto denso: sean J y K dos conjuntos tales que $J \subset K$. Decimos que J es denso en K si $\forall x \in K$ y $\forall \varepsilon > 0$, $\exists y \in J$ tal que la $d(x, y) < \varepsilon$.

Función topológicamente transitiva: f es topológicamente transitiva en D si para cualquier pareja de subconjuntos ($\neq \emptyset$) abiertos A y B de D , existen $a \in A$ y $n \geq 1$ tales que $f^n(a) \in B$.

Sensibilidad a las condiciones iniciales: f es sensible a las condiciones iniciales en D , si $\exists \varepsilon > 0$ tal que $\forall x \in D$ y $\forall \delta > 0$, existen $y \in (x - \delta, x + \delta) \cap D$ y $n > 0$ tales que $|f^n(y) - f^n(x)| \geq \varepsilon$.

El problema de los tres cuerpos. De una manera muy simplificada, ya que el problema en toda su extensión requiere conocimientos de cálculo infinitesimal y física avanzados, podemos proponer lo siguiente.

Inicialmente consideremos dos cuerpos sometidos a la ley de gravitación universal, uno de ellos girando alrededor del otro como es el caso entre el Sol y la Tierra. La figura A.7.1 muestra un esquema del modelo, destacando los aspectos importantes. Recordemos que la velocidad tangencial tiene una componente horizontal (eje x) que llamaremos v_x y una vertical, que llamaremos v_y y su suma indica la velocidad total v (un vector) en cada punto de la trayectoria.

Sabemos que ambos cuerpos se atraen con una fuerza F igual a:

$$F = Gm_1 \times m_2 / r^2 \quad (\text{A.7.1})$$

El problema de los dos cuerpos

Fig. A.7.1

en donde m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos, G es una constante gravitacional y r es la distancia entre los dos centros de masa. Bajo ciertos supuestos este sistema es descrito por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden (S.D. Conte, 1965, p. 252):

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 &= -Gx/r^3 \\ d^2y/dt^2 &= -Gy/r^3, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (\text{A.7.2})$$

Si adicionamos otro cuerpo, el sistema a resolver es de gran complejidad. De nuevo, sin entrar en detalles, el sistema de ecuaciones más sencillo que resuelve este problema es:

$$\begin{aligned} x' &= f_1 = u \\ u' &= f_2 = 2v + x - \frac{\mu(-1+x+\mu)}{(y^2+z^2+(-1+x+\mu)^2)^{3/2}} - \frac{(1-\mu)(x+\mu)}{(y^2+z^2+(x+\mu)^2)^{3/2}} \\ y' &= f_3 = v \\ v' &= f_4 = -2u + y - \frac{y\mu}{(y^2+z^2+(-1+x+\mu)^2)^{3/2}} - \frac{y(1-\mu)}{(y^2+z^2+(x+\mu)^2)^{3/2}} \\ z' &= f_5 = w \\ w' &= f_6 = -\frac{z\mu}{(y^2+z^2+(-1+x+\mu)^2)^{3/2}} - \frac{y(1-\mu)}{(y^2+z^2+(x+\mu)^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

Estas ecuaciones no tienen solución analítica. Requieren soluciones numéricas utilizando el computador. Se describen mediante series de tiempo *divergentes*. Poincaré trató de pensar en cómo era la dinámica de estos cuerpos; su extraordinaria intuición y sus enormes capacidades matemáticas lograron describir trayectorias muy cercanas a las actualmente encontradas mediante el uso del computador. Se dio cuenta de que pequeñas modificaciones en las condiciones iniciales de los cálculos, producían enormes diferencias en los resultados posteriores. Sin saberlo, había indagado en los fundamentos de la teoría del caos.

A.7.2 Sissa, Fibonacci y el crecimiento exponencial

El arroz de Sissa. (Este numeral está basado en L. Smith, 2007). La historia del ajedrez se remonta a lo que su creador, Sissa Ben Dahir solicitó al rey de Persia como recompensa por su descubrimiento: un grano de arroz por el primer escaque, dos por el segundo, cuatro por el tercero hasta cubrir los 64 cuadros.

En términos matemáticos la solicitud del total de granos de arroz es:

$$= 2^0 + 2^1 + 2^2 + \dots + 2^{63} = 1 + (2 \times 2^0 + 2 \times 2^1 + 2 \times 2^2 + \dots + 2 \times 2^{62})$$

Parece sencillo. $1 + 2 + 4 + 8 + \dots$ Si calculamos los granos de arroz para la primera fila, tendremos: $2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5 + 2^6 + 2^7 = 1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32 + 64 + 128 = 255$.

La serie indicada se conoce como una serie geométrica. Si a es el primer término de la serie y r es la proporción o razón a la cual crece, cada nuevo término será igual al anterior, multiplicado por la razón: $a, ar, ar^2, ar^3, \dots$

La suma de una serie geométrica finita:

$$S = a + ar + ar^2 + \dots + ar^{n-1}. \quad (\text{A.7.3})$$

es igual a:

$$S = a(1 - r^n)/(1 - r) \quad (\text{A.7.4})$$

También se suele presentar como:

$$S = a(r^n - 1)/(r - 1). \quad (\text{A.7.5})$$

Aplicándola al ejemplo anterior, tendremos, para $a = 2$ y $r = 2$:

$$S = 1 + 2(2^7 - 1)/(2 - 1) = 1 + 2 \times (128 - 1) = 255.$$

El total de lo pedido por Sissa era de: $S = 1 + 2(2^{63} - 1)/(2 - 1) = 18.4 \times 10^{18}$ granos, un número difícil de imaginar. Si suponemos que en un kg de arroz hay unos 30.000 granos, entonces la solicitud era de: $18.4 \times 10^{18} / 30000 \approx 3.1 \times 10^{14}$ kg = 6.15×10^{11} toneladas = 615×10^9 toneladas de arroz. La producción mundial de arroz se estima en 475×10^6 toneladas. Por lo tanto el dato anterior implica la producción mundial de arroz de los próximos $615 \times 10^9 / 475 \times 10^6 \approx$ ¡1290 años!

El crecimiento exponencial crece fuera de toda proporción.

Si Sissa hubiera pedido 1 grano para el primer recuadro, 2 para el segundo, etc. el total de arroz hubiera sido de: $1 + 2 + 3 + \dots + 64 = 64(1 + 64)/2 = 2080$ granos de arroz. Si duplicara esta serie aritmética pidiendo 1 por el primero, 3 por el segundo, 5 por el tercero etc. el total sería: $1 + 3 + 5 + 7 + \dots + 127 = 4096$. Supongamos que la aumentamos en 1000 granos por cada nuevo recuadro: $1 + 1001 + 2001 + \dots + 63001 = 2.016.064$. Esta serie, a diferencia de la anterior, es aritmética, no geométrica.

Una serie aritmética se define de la siguiente manera. Sea a el primer término, y d la diferencia común. Cualquier término, diferente al primero, será igual al anterior más el valor de d :

$$a, a + d, a + 2d, a + 3d \dots \quad (\text{A.7.6})$$

La suma s de los primeros n términos será:

$$\begin{aligned} s = & a + (a + d) + (a + 2d) + (a + 3d) + \dots \\ & + [a + (n - 2)d] + [a + (n - 1)d]. \end{aligned} \quad (\text{A.7.7})$$

La ecuación que permite calcular la suma s cuando el último término es l , es:

$$s = n(a + l)/2. \quad (\text{A.7.8})$$

Aplicando esta fórmula al caso en el cual $d = 1000$, para $a = 1$, obtendremos:

$$l = 1 + 63 \times 1000 = 63.001 \therefore s = 64(1+63.001)/2 = 2.016.064.$$

Por mucho que se aumente esta serie, jamás alcanzaría el efecto de la exponencial. Un aumento en el parámetro de la serie lineal (aritmética), 1000 en el último ejemplo, tiene un efecto lineal en el resultado final. Por el contrario, una variación, aún muy pequeña en el caso exponencial, tiene un efecto dramático. Por ejemplo, si cambiamos de 2 a 2.2 la variación de la solicitud de Sissa, es decir, un grano en el primer escaque, 2.2 en el segundo, 4.84 en el tercero y así sucesivamente, el resultado final sería de 6.8×10^{21} , un incremento de aproximadamente 370 veces.

Visto de otra manera: un aumento en 1000 veces el crecimiento lineal, genera aproximadamente un aumento en 1000 veces el resultado final. Un aumento de 0.2 en el crecimiento exponencial, generó un aumento de 370 veces en el resultado final.

Consideremos dos series aritméticas y confrontémoslas con la geométrica de Sissa.

La primera será con $a = 10.000$ y $d = 10^6$; la segunda con $a = 10.000$ y $d = 10000 \times 10^6$. La figura A.7.2 muestra la sumas respectivas y la suma de la serie de Sissa (línea continua).

Dos series de crecimiento lineal y una de crecimiento exponencial

Fig. A.7.2

Piénsese ahora cuál puede ser el impacto de este tipo de crecimiento en caso de incertidumbre. En la predicción, puede existir un momento en el cual una

incertidumbre de crecimiento exponencial sea muy pequeña y estará por debajo de una lineal. Pero a largo plazo la diferencia es inmensa, en cuanto a los efectos de las incertidumbres de crecimiento exponencial. Por esta razón, este tipo de crecimiento exponencial es el que es tenido en cuenta para definir el Caos.

Los conejos de Fibonacci. Leonardo de Pisa quería calcular el crecimiento de los conejos. Estos, en su propuesta, podían crecer indefinidamente en población. ¿Si cada pareja produce un par cada mes, cuántos conejos habrá en un año?

En el primer mes habrá una pareja joven. En el segundo mes esta pareja madura, y tienen en el tercer mes, una pareja de conejos. Por lo tanto, en el tercer mes, tendremos una pareja madura, y una pareja joven (recién nacidos). En el cuarto mes tendremos una nueva pareja de recién nacidos de la pareja original, y dos parejas maduras para un total de tres parejas. En el quinto mes tendremos dos pares nuevos, recién nacidos de las dos parejas maduras y habrá tres pares de parejas maduras para un total de cinco. Etc.

Entonces, en el primer mes hay una pareja joven; en el segundo, una pareja madura; en el tercer una madura y una inmadura; en el cuarto dos maduras y una inmadura; en el quinto tres maduras y dos inmaduras, etc. La secuencia es 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21... Nótese que, iniciada la serie (valores 1 y 1 en este caso), cada número que sigue es igual a la suma de los dos que le preceden. El primer número que antecede al nuevo número, es el total del mes anterior, y el penúltimo, el número de parejas maduras, que es el número de nuevos pares que llegan en el mes. Se trata, pues, de una serie de tiempo.

Esta serie se presenta una y otra vez en la naturaleza: en la estructura de los girasoles, los conos del pino, y en las piñas. Su importancia, en nuestra discusión, es que se acerca mucho a un crecimiento exponencial.

Consideremos ahora la secuencia: $1/1 = 1$, $2/1 = 2$, $3/2 = 1.5$, $5/3 = 1.666...$, ..., $89/55 = 1.618181...$ Estos valores tiende a $\varphi = (1+\sqrt{5})/2 = 1.6180339887...$ que se conoce como el número áureo o razón áurea (φ en honor al escultor Fidias).

Al construir bloques cuya longitud de lado sean números de Fibonacci se obtiene el dibujo indicado en la figura A.7.3 (Wikipedia).

La sección áurea

Fig. A.7.3

Si comparamos la serie de potencia con factor $\varphi^{t/2}$ ($t = 1, 2, 3 \dots$) con la de Fibonacci, vemos que esta última tiende a la primera, como se ilustra en la gráfica A.7.4.

Serie de potencia de factor $\varphi^{t/2}$ y la de Fibonacci

Fig. A.7.4

¿Qué nos puede enseñar esta serie de Fibonacci con respecto a la incertidumbre?

Supongamos que en lugar de una pareja inicial, existían realmente dos parejas, sólo que una de ellas no fue observada. La nueva serie será 2, 3, 5, 8,... En el mes 12 tendríamos 377 conejos, en lugar de los 144 previstos. Una gran diferencia entre lo real y lo predicho. Una pequeña diferencia en el número inicial de conejos genera una gran diferencia en la predicción.

Si la secuencia hubiera sido lineal, una mejora en la medida, digamos del orden de diez, podríamos predecir diez veces más datos antes de alcanzar el error inicial. Si la incertidumbre del valor inicial se reduce en 1000, podremos predecir 1000 datos más con la misma precisión. Esta es una gran ventaja de los modelos lineales, por lo que es atractivo estudiar sólo este tipo de modelos. Por el contrario, si el modelo es no lineal y la incertidumbre crece exponencialmente, al reducir nuestra incertidumbre en un valor de 10, sólo podremos predecir el doble de datos con la misma precisión. Si suponemos que el crecimiento exponencial es uniforme en el tiempo, reducir la incertidumbre por un factor de 1000 sólo aumentará nuestro rango de predicción, con la misma precisión, en un factor de ocho. Aumentar la precisión es costoso. Por lo que buscar mejorar la precisión, en procesos no lineales, puede ser prohibitivo.

De hecho, existe la idea de que no es posible de estar completamente ciertos de una observación que haya sido afectada por el ruido del caos. Para reducir la incertidumbre del número de conejos inicialmente en la secuencia, se podría contratar personal que hiciera diversos recuentos y predecir con cada uno de estos datos como condiciones iniciales, el comportamiento del sistema.

Luego, se confrontarían los diferentes modelos con los datos de la realidad, y así eliminar aquellos datos que están realmente fuera de lo observado. Claro que esto tiene sentido si nuestro modelo es literalmente perfecto, lo que quiere decir, en nuestro ejemplo, que el “mapa de los conejos” captura el comportamiento reproductivo y la longevidad de los conejos, exactamente. Si el modelo es perfecto, podemos utilizar las observaciones futuras, para aprender de las observaciones del pasado. Esto se conoce como reducción de ruido. Pero si no lo es, entonces terminaremos con resultados incoherentes.

¿Mas, qué ocurriría si lo que estamos midiendo no son números enteros sino asuntos como la temperatura, o la posición de un planeta? ¿Es acaso lo mismo, la temperatura de un modelo, que la temperatura del mundo real? Estas preguntas fueron las que inicialmente interesaron a los filósofos del Caos. Pero antes, preguntémonos por qué los conejos nacidos desde 1202 hasta hoy, es decir, después de más de 9.000 meses, no cubrieron nuestro planeta.

En meteorología existe una máxima: ninguna predicción es completa sin un estimativo útil de la incertidumbre en la predicción. (Lloverá mañana con un 15% de probabilidad). Si conocemos que la condición inicial es incierta entonces nos interesaremos no sólo en la predicción *per se*, sino también en conocer cómo sería la predicción del error.

La predicción de error, para cualquier sistema real, no debe crecer sin límite. Para constatarlo, basta suponer que la condición inicial tenga un error infinitesimal (tan pequeño como queramos, pero superior a cero); este error permanecerá infinitesimalmente pequeño todo el tiempo, a pesar de que crezca exponencialmente.

Los factores físicos limitan al crecimiento exponencial continuamente. Para el caso de los conejos, la comida y el espacio disponible son factores claves de subsistencia y crecimiento. Es la ecuación con la que iniciamos el estudio de la Teoría del Caos. Esto nos hace pensar que aún los modelos más inadecuados estarán restringidos de tal manera que los errores de predicción están limitados.

En el numeral siguiente ampliaremos un poco este tema.

A.7.3 Ecuación poblacional renormalizada

Lo que sigue ha sido tomado de J. Gribbin (2007, p. 119-120). Sea la ecuación, ya conocida:

$$x_{n+1} = kx_n(L-x_n) \quad (\text{A.7.9})$$

Consideremos el caso de un insecto cuya población adulta muere en el invierno, pero quedan huevos que eclosionan en la primavera. Si tenemos una población adulta de x individuos, los cuales ponen huevos a una tasa de k huevos por individuo, tendremos que al final de invierno habrá kx huevos. Pero parte de estos individuos mueren por causas tales como la falta de alimento. Esta mortalidad dependerá del tamaño de la población inicial. Se puede fijar un límite máximo de población, lo cual tiene sentido si consideramos la “capacidad de carga” del sistema en el cual habita el insecto. Si dividimos la población real por dicho número, entonces el valor de x estará en el rango $[0,1]$; el número esta *renormalizado*. Al tomar la tasa de mortalidad prematura, entonces el

término kx deberá ser multiplicado por el factor $(1-x)$. La ecuación resultante (ecuación logística) es la (A.7.9), con $L=1$. Esta ecuación es no lineal. Nótese que si x es pequeño, entonces el número de huevos crece libremente (en forma exponencial). Pero a medida que x se acerca a 1, el incremento de huevos será cada vez menor puesto que cada vez más población morirá por efecto del hambre o de los depredadores.

Si k es menor que 1, no habrá reproducción suficiente para conservar la especie a la larga. Por grande que sea el valor inicial de x , la especie desaparecerá. La situación se vuelve interesante para valores de k mayores que la unidad, tal y como lo hemos indicado en el numeral 7.1.

En forma más general. Sea la función real $y = f(x)$. Escojamos un valor de x , digamos x_0 , de tal forma que al dividir todos los valores de x por x_0 , la escala se reduce a una entre 0 y 1, o -1 y 1. Realicemos algo similar para el caso de la variable y utilizando el valor y_0 . De acuerdo con lo indicado tendríamos la nueva relación:

$$y/y_0 = f(x/x_0) \rightarrow y = y_0 f(x/x_0) \quad (\text{A.7.10})$$

Hemos normalizado la ecuación $y = f(x)$.

A.7.4 Dimensión fractal

Existen ideas intuitivas que van adquiriendo características abstractas y llegan a convertirse en definiciones de carácter matemático.

Un ejemplo sencillo es el acto de elevar un número entero a una potencia dada. Para fijar ideas consideremos la operación 3^3 . El sentido de esta operación es multiplicar tres veces el número tres por sí mismo: $3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27$. Comprensible para los números enteros positivos. Pero ¿y en el caso de los racionales? Por ejemplo ¿qué sentido tiene $(3/4)^3$? La extensión del concepto da una respuesta que tiene sentido matemático: $(3/4)^3 = (3/4) \times (3/4) \times (3/4) = 27/64$. Por otra parte $(3/4)^3 = 0.75^3 = 0.421875 = 27/64$. La regla sigue siendo la misma. ¿Y con los números negativos (tanto enteros como racionales)? Por ejemplo $(-3)^3 = -27$ (sigue siendo negativo), mientras que $(-3)^2$ da 9 (positivo). Pero la regla ha demostrado que se puede aplicar de la misma forma y los resultados tienen aplicabilidad en el mundo real.

Una nueva sutileza aparece en la operación $(3)^{-3}$. En este caso no tiene sentido interpretar la operación como “¡3 multiplicado entre si menos tres veces!”. El álgebra nos permite, para los números reales, establecer el equivalente: $(3)^{-3} = 1/3^3 = 1/27$.

Pero surge una novedad. En muchos cálculos aparece un operación del tipo a^x en donde x es un número real cualquiera. En concreto, ¿cuánto vale $3^{1.2}$? Esta operación tampoco puede interpretarse como “¡multiplicar a 3, 1.2 veces entre sí!”. La exponenciación toma ahora otro giro. Esta nueva apreciación surge del concepto de logaritmo de un número.

John Napier (Neper), matemático Escocés (1550-1617) definió el concepto de logaritmo. Este concepto permitía convertir los productos en sumas y las divisiones en restas, facilitando enormemente el cálculo sobre todo en el campo de la Ingeniería. Pero su influencia llegó mucho más lejos.

El logaritmo de un número (Napier los denominó *números artificiales*) se define como el exponente al que hay que elevar una *base* para obtener dicho número. En términos matemáticos:

$$\log_b a = x \leftrightarrow b^x = a \quad (\text{A.7.11})$$

Esta expresión se lee: logaritmo en base b , de a , es igual a x . Estos valores deben cumplir ciertas condiciones:

- Para el caso de número reales, los números negativos no tienen logaritmo, puesto que si $b > 0$, b^n siempre será mayor que 0. Sin embargo esto no ocurre cuando la definición se extiende al campo de los números complejos.
- Sin importar la base, el logaritmo de la base será igual a 1: $\log_b b = x \leftrightarrow b^x = b \rightarrow x = 1$.
- Sin importar la base, el logaritmo de 1 siempre será 0.

Por lo tanto la expresión $3^{1.2} = b$ se expresaría, en logaritmos: $\log_3 b = 1.2$. Existen tablas, y máquinas calculadoras, que permiten conocer los logaritmos de números reales positivos (y por lo tanto la operación inversa, calcular los antilogaritmos). Los cálculos generalmente existen para la base 10, y por razones técnicas, para la base $e = 2.718281$, ya que a partir de ellas es posible calcular el logaritmo en cualquier otra base. La operación es la siguiente, para una base b y la base 10:

$$\log_b a = \log_{10} a / \log_{10} b \quad (\text{A.7.12})$$

Así, para calcular b a partir de $\log_3 b = 1.2$ escribiremos

$$\begin{aligned} \log_3 b &= \log_{10} b / \log_{10} 3 = \log_{10} b / 0.47712 = 1.2 \\ \log_{10} b &= 1.2 \times 0.47712 \approx 0.57254 \end{aligned}$$

Es posible conocer, a partir de una tabla de logaritmos, cuál es el número cuyo logaritmo es 0.5725 (el antilogaritmo) y vemos que corresponde 3.737. Por lo tanto, $3^{1.2} = 3.737$. Todavía queda algo del sentido común: es obvio que este número debe estar entre 3 y 9 y más cerca de 3, que de 9¹⁸⁵. Claro que, con las calculadoras actuales, el resultado se obtiene en un solo paso.

Veamos ahora la idea de dimensión en un espacio euclidiano.

Como vimos en el numeral 7.2 Peano había descubierto cómo una línea sin espesor, podía generar una superficie plana ya que cada punto del plano estaría contenido en una sola línea. ¿Qué dimensión tendría este plano?

Mandelbrot desarrolló el concepto: la dimensión fractal. Debemos aclarar que no existe unanimidad frente a esta medida. Hay diferentes formas de proponerla y no son, en general, equivalentes. Consideremos el siguiente caso.

Dimensión de homotecia.

Por homotecia entendemos una transformación lineal seguida por una rotación. Se le denomina también *transformación afín*.

Sabemos que la base de los fractales es la autosimilitud: cualquier parte repite al todo. Consideremos un segmento de recta. Podemos dividirlo en diferentes partes iguales. La figura A.7.5 da una idea al respecto.

Dividamos la recta de longitud l (parte superior de la figura) por un factor f , factor de escala ($f = 1, 2, 3$ en nuestro caso). Como ejemplo propongamos $f = 3$. Obtenemos así 3 copias de la recta original: $N = 3$. Establecemos la relación $N = f^D$. De aquí se deduce que $D = 1$, que es la dimensión de la figura obtenida, del fractal.

185. Otro ejemplo interesante es el concepto de factorial.

Dimensiones y homotecia

Fig. A.7.5

Analícemos esta situación en un cuadrado (ver de nuevo la figura A.7.5). Dividamos cada lado del cuadrado en dos partes iguales ($f = 2$). Obtendremos cuatro copias de dicho cuadrado ($N = 4$). De nuevo escribimos la ecuación $4 = 2^D$, de donde se obtiene que $D = 2$. La dimensión del cuadrado es dos. Si dividimos por tres cada lado obtendremos nueve cuadrados similares. Para este caso $9 = 3^D$ y por lo tanto $D = 2$. De nuevo, la dimensión del cuadrado es 2.

Si dividimos por tres cada lado obtendremos nueve cuadrados similares. Para este caso $9 = 3^D$ y por lo tanto $D = 2$. De nuevo, la dimensión del cuadrado es 2.

En el caso del cubo si dividimos sus lados en dos partes iguales obtendremos ocho cubos similares. Escribamos entonces: $8 = 2^D$, es decir, $D = 3$. En el caso de dividir por tres cada lado del cubo original obtendremos 27 cubos pequeños. Nuestra relación es ahora $27 = 3^D$, es decir, $D = 3$. La dimensión del cubo es tres.

Analícemos ahora la curva de Koch (figura A.7.6). En este caso, hemos utilizado un factor $f = 3$. El resultado son cuatro copias, $N = 4$. Escribiremos entonces: $4 = 3^D$. Utilizando logaritmos tendremos que: $D = \log(4)/\log(3) = 1.2619\dots$ La curva de Koch es de dimensión 1,2619, se encuentra entre las dimensiones 1 y 2: ni es una línea recta, ni un plano.

Transformaciones de homotecia por la curva de Koch

Fig. A.7.6

Tenemos, pues, que la dimensión de un fractal se puede calcular mediante la relación:

$$D = \log(N) / \log(f) \quad (\text{A.7.13})$$

Como aplicación práctica, consideremos las antenas fractales (numeral 7.2). Una antena que tenga la forma de un cristal de copo de nieve (figura 7.8) tiene una dimensión fractal de $\ln 4 / \ln 3 = 1.26186$, lo cual implica que cubre una dimensión superior a uno, siendo por lo tanto mejor que una antena clásica de dipolos y mejorando sensiblemente su impedancia.

A.7.5 ¿Onda? ¿Partícula?

El siguiente experimento crucial comprobó el doble comportamiento de un haz de luz: produce dispersión, como si estuviera formado por partículas, y genera interferencia, propiedad típica de las ondas.

En esta parte nos dejaremos guiar por Hewitt (2004) y por Roldán *et al* (2004). Para asimilar el concepto de la luz como partículas pensemos en disparos de pequeñísimas esferas que siguen reglas bien definidas. En cualquier instante de tiempo ellas ocupan un lugar definido en el espacio: dos de ellas no pueden ocupar el mismo lugar. Si chocan, rebotan y quizá puedan romperse, pero cada una conserva su identidad.

Para la onda pensemos en dos personas que sostienen una cuerda que está tensada. Si una de ellas sacude un extremo, la deformación producida se propaga a lo largo de la cuerda, hasta llegar al extremo opuesto. La deformación se denomina pulsación o pulso. Lo importante es que lo que se transmite es energía, sin desplazamiento horizontal de materia, tal como ocurre cuando, al arrojar una piedra en el agua, se forman ondas; si se coloca un pequeño corcho

en el área en que se forman las ondas, vemos que este sube y baja, pero no se desplaza con la onda. Igual ocurre con la cuerda; cada punto se mueve hacia arriba y hacia abajo, para al final quedar en reposo.

Supongamos ahora que cada una de las personas que sostienen la cuerda, agitan los extremos. Se forman dos pulsos que viajan en direcciones contrarias. Antes de encontrarse, cada uno se comporta como si el otro no existiera. Cuando se encuentran, se combinan de forma complicada. Esto se conoce con el nombre de interferencia. Luego, cada uno sigue su camino como si nada hubiera ocurrido. Las pulsaciones se pueden encontrar, y estas no son alteradas, se superponen. Esto no ocurre con las partículas. El principio de superposición nos dice que para calcular la pulsación resultante en cualquier momento, se deben sumar los desplazamientos individuales, en dicho momento.

El pulso es una forma de onda. Estas transportan energía y cantidad de movimiento en un medio, sin transporte de materia. Las ondas en general pierden su forma cuando se propagan. Las ondas armónicas no lo hacen. Este constructo mental es muy útil al describir muchos fenómenos del mundo real. Hay dos cantidades importantes asociadas las ondas: la amplitud (A) que es la máxima distancia que alcanza una partícula de la cuerda, a partir de su posición de equilibrio, y la longitud de onda (λ) que es la distancia entre dos máximos o dos mínimos. Ver figura A.7.7. La línea punteada representa a la cuerda en equilibrio, cuando no pasa a través de ella ninguna onda.

Se denomina período al intervalo de tiempo entre dos puntos equivalentes de una onda. Se mide fácilmente entre dos máximos o dos mínimos. El inverso del período se conoce como la frecuencia ν de la onda.

Debido al principio de superposición las ondas se pueden reforzar, debilitar e incluso anular. Esto último ocurre cuando la parte positiva de una onda se encuentra con una negativa del mismo valor.

Otro fenómeno típico de las ondas es la difracción. Ocurre cuando la onda encuentra un obstáculo. Si es sólido y de un tamaño adecuado con respecto a la longitud de la onda, trata de rodearlo y continuar su camino (por eso, en ocasiones, podemos oír a través de las paredes). Las ondas más largas se difractan más. La frecuencia de las sirenas usa este principio. Un objeto visto al microscopio si tiene un tamaño menor que la longitud de onda de la luz no se podrá ver. La difracción lo impide. Ninguna técnica logrará vencer este límite fundamental de la difracción. Puede también encontrarse con una pared perforada con una pequeña rendija. En este caso la onda la atraviesa y

Geometría de una onda

Fig. A.7.7

dependiendo de la anchura de la rendija con respecto a su longitud de onda, continuará con ondas aplanadas en su frente (orificio de mayor abertura), o con ondas cada vez más esféricas, de difracción mayor.

Si una onda encuentra en su camino dos rendijas pequeñas convenientemente separadas, esta las atraviesa y se forman, al salir, dos fenómenos ondulatorios generados por la difracción (figura A.7.8 b)). Estas dos ondas, gracias al principio de superposición, generarán puntos de reforzamiento y de anulación. Este es un esquema del experimento de Young. Los puntos de anulación se dan en los cruces de los frentes de onda. La onda incidente se ha supuesto plana. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, con la luz del sol: a mayor distancia de la fuente luminosa, menor curvatura en el frente de onda. De todas maneras, si el frente de onda fuera curvo no habría diferencia con el resultado del experimento. En lo que se refiere a las partículas, estas pueden explicar la reflexión, con cierta dificultad la refracción, mas no la difracción.

Estamos en capacidad, ahora, de analizar el experimento crucial que demostró la dualidad onda-partícula en la luz y en haces de electrones. Siguiendo la figura A.7.8 a), consideremos un haz de luz monocromática (todos los fotones tienen la misma energía) que llega al primer obstáculo, pero en el cual se ha cerrado el orificio inferior. Como la luz está formada por partículas (fotones), estos, al encontrar el borde de la hendidura podrían cambiar la dirección de su trayectoria, generándose direcciones al azar.

Si la luz es intensa, la iluminación de la pantalla será aceptablemente uniforme. Pero al disminuir la intensidad de la luz se observarán puntos individuales distribuidos aleatoriamente. La recepción de la pantalla es de un fotón o de ninguno. No hay energías de medio fotón o algo parecido. Se sigue la ley de Planck: $E = h\nu$.

Experimento de Young: onda y partícula

Fig. A.7.8

Permitamos ahora que ambas rendijas estén abiertas (Fig. A.7.8. b). Si la luz es intensa, hay cierta apariencia de regularidad en la iluminación de la pantalla, pero se observarán bandas de unos cuantos milímetros, como se indica en dicha figura. Lo extraño es que hay puntos a los cuales no llega ningún fotón. En otros puntos la intensidad de la iluminación es el cuádruple de la original, cuando lo lógico es que fuera, como máximo, el doble. Ninguno de estos fenómenos es posible explicarlos si consideramos a la luz formada por fotones. El comportamiento es típico de un fenómeno ondulatorio.

La distancia entre las dos hendijas es de unas 300 veces el tamaño de un fotón. ¿Cómo “sabe” el fotón cuándo está abierta sólo una de ellas, para comportarse como partícula, o cuándo están abiertas las dos, para comportarse como onda? Como partícula podrá atravesar una sola; como onda, dado que se trata de una perturbación, no hay dificultad de que la misma onda pase por ambas hendijas a la vez. Dice Penrose (2002, p. 283):

Aparentemente, para que tenga lugar la interferencia debe haber una “falta de conocimiento” acerca de qué rendija atravesó “realmente” la partícula. Para obtener la interferencia, ambas opciones deben contribuir, a veces “sumándose” –reforzándose en una cantidad que es el doble de lo que cabría esperar– y a veces “restándose”, de modo que las opciones puedan cancelarse mutuamente. En realidad, según las reglas de la mecánica cuántica, lo que está sucediendo es todavía más misterioso que eso. Las opciones pueden efectivamente sumarse (los puntos más brillantes de la pantalla) y restarse (los puntos oscuros), pero también deben poder combinarse

en otras formas extrañas, tales como:

... “Alternativa A” más $i \times$ “alternativa B”,

donde “ i ” es la raíz cuadrada de -1 .

Debemos detenernos aquí. Se hace obligatorio, para quien quiera profundizar, recurrir a los textos que tratan estos temas. Hemos indicado tres referencias importantes.

A.8.1 Small Worlds

En su comentado artículo de la revista *Nature*, Watts y Strogatz (1998) hacen diversos comentarios respecto a los grafos de “Mundos pequeños”.

Ellos destacaban que los estudios hechos hasta ese momento sobre fenómenos autoorganizados, modelables mediante redes (grafos) pertenecían a dos categorías bien definidas: o se trataba de grafos completamente regulares, o totalmente aleatorios. Sin embargo, comentaban que muchas redes biológicas, tecnológicas y sociales estaban entre estos dos extremos. Un terreno intermedio generado por redes regulares que se “reconectaban” introduciendo cantidades crecientes de desorden. Tales redes resultaban ser altamente agrupadas, pero tenían la característica de poseer trayectorias cortas entre sus nodos, a la manera de las aleatorias.

En la figura A.8.1 se muestra un grafo regular no dirigido (el de la izquierda), uno aleatorio (el de la derecha) y uno intermedio que corresponde a los “mundos pequeños”.

La idea es, partiendo de un grafo regular con n vértices y k_v aristas por vértice, reconectar todos los nodos, al azar con una probabilidad de conexión p , eliminando la arista correspondiente. Esto permite obtener diversos tipos de grafos. Si $p = 0$, tendremos un grafo regular; si $p = 1$, el grafo será totalmente aleatorio. Para $0 < p < 1$ es posible obtener una infinidad de grafos intermedios.

Recordemos que la longitud característica de una trayectoria L , es el resultado del promedio de todas las rutas más cortas entre $k_v(k_v - 1)/2$ aristas entre ellos, lo que ocurre cuando cada vecino de v_i está conectado con todos los otros vecinos de v_i . Definamos como C_i al número de aristas actuales entre vecinos dividido por el número de aristas posibles entre vecinos. Definamos por C , coeficiente

Grafo regular de 8 vértices, 8 aristas y $k = 2$.

Grafo intermedio de 8 vértices, 8 aristas.

Grafo aleatorio de 8 vértices, 10 aristas.

Grafos regular, mundos pequeños y aleatorio

Fig. A.8.1

de agrupamiento de un grafo, al promedio de C_i con respecto a todos los v_i . Para redes amigables, los parámetros L y C tienen significados concretos: L es el número promedio de amigos en la cadena más corta que conecta a dos personas; C_i indica el grado en que los amigos de v_i son también amigos entre sí, por lo que C_i mide el grado de “camaradería” (exclusividad) de un círculo típico de amigos.

Las redes que interesaban a estos dos autores eran aquellas que tenían muchos nodos con conexiones escasas, pero no tanto como para que el grafo no pudiera quedar completamente conectado. Este debería por lo tanto tener muchos más nodos que ejes por vértice y además debería cumplir con la condición de Erdős, $k \gg \ln(n)$, para garantizar la conectividad del grafo como se indicó en el numeral 8.3.

Los análisis demostraron que para grafos con probabilidad cercana a cero los valores de L eran mucho mayores que 1 y C se aproximaba a $\frac{3}{4}$. Por otra parte cuando p tendía a 1, L se acercaba al número de Erdős $\ln(n)/n$ pero C era muy inferior a 1. En otras palabras, si $p = 0$ el grafo es altamente agrupado pero “alargado”; si $p = 1$, el grafo es poco agrupado (sí conectado) con un valor de L que tiende al $\ln(n)$.

Los experimentos en el computador indicaron que hay un rango amplio de valores de p durante el cual el valor de $L(p)$ es similar al de un grafo aleatorio,

con un grado de “camaradería” mayor que el de uno aleatorio. Cuando se introducen aristas aleatorias entre nodos muy distantes, se producen “atajos” de tal manera que al disminuir el valor de p , el impacto en L es no lineal, haciendo que las distancias se contraigan en una especie de efecto en cascada, mientras que los valores de C sólo son ligeramente modificados, generándose así una red de “mundos pequeños”. El misterio de estas redes había sido desvelado.

A niveles locales, la transición hacia mundos pequeños es prácticamente indetectable. Esta propiedad fue comprobada extensivamente mediante cálculos de gran número de redes en el computador. La condición: reconectar aleatoriamente con pares de nodos que estén muy separados unos de otros.

Con respecto a las redes aleatorias podemos hacer las siguientes referencias.

Si denominamos $P(d)$ la fracción de nodos que tienen un grado d y los nodos se conectan al azar con una probabilidad igual a p , independiente de las conexiones realizadas, la probabilidad de que un nodo tenga un grado d tiene una distribución binomial indicada en la ecuación (A.8.1):

$$\left(\frac{n-1}{d}\right)p^d(1-p)^{n-1-d} \quad (\text{A.8.1})$$

Si n es mucho mayor que p esta distribución se aproxima a una distribución de Poisson y la probabilidad de que un nodo tenga d interconexiones es:

$$p(d) = \frac{e^{-(n-1)p}((n-1)p)^d}{d!} \quad (\text{A.8.2})$$

Si p es muy inferior a $1/n$ los nodos están muy aislados con pocos nodos interrelacionados. Si p sobrepasa el valor $1/n$ empieza a aparecer un nodo que aglutina una gran cantidad de otros nodos (un hub), y aparecen ciclos. Si p sigue aumentando, la red se va convirtiendo en un todo altamente integrado. Esto fue lo que observó Kauffman en su juego de los botones.

Otra característica de estas redes es que el número de nodos con un grado dado, $P(d)$ tiende a:

$$P(d) = cd^{-\lambda} \quad (\text{A.8.3})$$

que no es otra que la ley del ruido o ley $1/f$. Recordemos que esta ley es invariante en la escala (scale free):

$$P(d)/P(d')=P(\kappa \times d)/P(\kappa \times d') \quad (\text{A.8.4})$$

Siendo κ un factor de escala cualquiera. Esta distribución tiene la característica de que la “cola” que se forma a medida que decrece, tiende a ser plana, diferente al caso de la Distribución Normal. Una “cola de dinosaurio”.

Con el fin de explicar la manera como las definiciones dadas se aplican a grafos específicos, consideremos el siguiente ejemplo relacionado con los tres grafos indicados en la figura A.8.1. Aclaremos que no puede considerarse como un ejemplo típico ya que tiene un número muy pequeño de nodos. Para el grafo ordenado, el de la izquierda de la figura A.8.1, la tabla de la figura A.8.2 muestra los datos correspondientes a las rutas más cortas entre los diferentes nodos, y la suma de tales mínimos. La primera celda indica con una I el nodo inicial y con una F el nodo final.

$\begin{matrix} F \\ I \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	L
1	0	1	2	3	4	3	2	1	16	16/7
2	1	0	1	2	3	4	3	2	16	16/7
3	2	1	0	1	2	3	4	3	16	16/7
4	3	2	1	0	1	2	3	4	16	16/7
5	4	3	2	1	0	1	2	3	16	16/7
6	3	4	3	2	1	0	1	2	16	16/7
7	2	3	4	3	2	1	0	1	16	16/7
8	1	2	3	4	3	2	1	0	16	16/7

Cálculo de las rutas más cortas entre nodo del grafo regular de la figura A.8.1

Fig. A.8.2

Por ejemplo, para calcular la suma de la ruta más corta entre el nodo 4 y los demás nodos haremos el siguiente análisis. Del nodo 4 al nodo 1 hay dos rutas:

4-3-2-1, de longitud 3 (en contra del sentido de las manecillas del reloj) y 4-5-6-7-8-1, de longitud 5 (en el sentido de las agujas del reloj). La longitud de la menor ruta será 3, que es el valor que aparece en la casilla correspondiente (fila 4, columna 1). El resto de los cálculos se hace en forma similar. La columna Σ es la suma de estas rutas. Para este grafo, $L = 128/(7 \times 7) = 2.612$. Además tenemos que, de acuerdo a la definición, $C = 0$.

Para el grafo de mundos pequeños, la tabla es la de la figura A.8.3.

$\begin{matrix} F \\ I \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	L
1	0	1	2	3	2	1	2	1	12/7
2	1	0	1	2	3	2	1	2	12/7
3	2	1	0	1	5	4	2	3	18/7
4	3	2	1	0	5	4	3	4	22/7
5	2	3	4	5	0	1	3	3	21/7
6	1	2	3	4	1	0	3	2	16/7
7	2	1	2	3	4	3	0	1	16/7
8	1	2	3	4	3	2	1	0	16/7

Cálculo de las rutas más cortas entre nodo del grafo de mundos pequeños de la figura A.8.1

Fig. A.8.3

En este caso

$$L = 133/49 = 2.714 \text{ y } C = (0+0+0+NA+NA+0+0+0)/6 = 0/6 = 0$$

Para la red aleatoria, con $p = 1/8$, el análisis se indica en la tabla de la figura A.8.4.

Los resultados indican que

$$L = 119/64 = 1.86 \text{ y } C = (0+NA+1/3+1+1+0+0+1)/7 = 10/21 = 0.477.$$

Pero esta es una mirada “estática” de la red, su parte estructural. ¿Qué podemos decir de su parte dinámica, de la forma como se propaga la información en la red? Información aquí significa comunicación entre nodos. los rumores,

$I \backslash F$	1	2	3	4	5	6	7	8	L
1	0	2	1	2	2	1	1	2	11/7
2	2	0	1	2	2	1	3	3	14/7
3	1	1	0	1	3	2	2	1	11/7
4	2	2	1	0	4	3	3	1	16/7
5	2	2	3	4	0	1	1	4	17/7
6	1	1	2	3	1	0	2	3	13/7
7	1	3	2	3	3	2	0	4	18/7
8	3	2	1	1	4	3	5	0	19/7

Rutas más cortas entre nodos del grafo aleatorio (Fig. A.8.1)

Fig. A.8.4

modas, opiniones, epidemias, corrientes eléctricas, paquetes de información en internet, neurotransmisores, calorías (en redes de alimentos), y un fenómeno mucho más general: “fallas en cascada”. (M. Mitchel, pg 255).

Las fallas en cascada ocurren cuando un nodo falla en ejecutar su tarea. En este caso, la tarea pasa a otro u otros nodos lo que puede causar sobrecarga en ellos y, por lo tanto la tarea inicial, que junto con las nuevas tareas no realizadas pasan a nuevos nodos, originan un efecto creciente de fallas que pueden hacer colapsar a la red entera. Este tipo de fenómenos no sólo ocurre en las redes eléctricas sino en la economía (compras nerviosas, por ejemplo) y en los sistemas sociales (pánico social, por ejemplo).

La resiliencia es una propiedad importante en las redes: es su capacidad de mantener trayectorias cortas a pesar de las fallas que puedan presentarse al azar en otros nodos. En el efecto en cascada, es la falla de uno o varios nodos los que causan fallas en otros: es un típico fenómeno de la teoría del caos. A veces culpamos de este fenómeno a intervenciones maliciosas en la red (en el sistema). Sin embargo, la causa resulta ser explicable por la dinámica del mismo sistema. Para el caso de las redes de mundos pequeños, si se afecta una subred altamente interrelacionada, prácticamente nada le ocurre al sistema total. En cambio si la afectada es una conexión “débil” –aquellas que conectan dos nodos distantes entre sí, nodos que no están agrupados el uno con el otro– se afectaría notablemente. La figura A.8.5 ilustra esta propiedad.

Resiliencia en una red

Fig. A.8.5

Existen dos subredes cada una de las cuales está totalmente conectada, es decir, se puede ir de un nodo a cualquier otro de la subred. Si se interrumpe una conexión de una subred, prácticamente la red total no sufre daño mayor. Pero si se afecta conexión indicada en trazo discontinuo, la red es afectada seriamente.

Antes de cerrar este literal, consideremos la siguiente situación. Las redes de mundos pequeños son "redes igualitarias", en las cuales de cada nodo salen pocos conectores. Pero en redes tales como las de internet, se observan concentraciones que poseen una enorme cantidad de conexiones, a diferencia de la gran mayoría que poseen menos, siguiendo la ley $1/f$. Esto se debe a que a medida que un cierto nodo va adquiriendo importancia, otros nodos prefieren unirse a ese, y no a otros menos notorios. Como se dice en el argot de las redes "el rico se vuelve más rico". Se las denomina "redes aristocráticas".

Sin entrar en detalles al respecto (ver Buchanan, 2002) a la larga estas redes tienden a saturarse, debido a una especie de "capacidad de carga del sistema", particularmente la velocidad de conexión y de respuesta. Entonces viran de redes aristocráticas, a igualitarias. De esta manera, una crítica que se le hacía a estas últimas, la de ser estáticas, no mostrando dinámica de crecimiento o la de ser redes sin historia, queda resuelta.

BIBLIOGRAFÍA

- Atlas Universal de Filosofía*. Grupo Océano, Barcelona, 2005.
- Ackoff, R. L. (1971): *Towards a System of Systems Concepts*. Management Science, 17, No. 1.
- (1994): *The democratic Corporation: A radical Prescription for recreating Corporate America and Rediscovering Success*. Oxford University Press.
- (2002): *El paradigma de Ackoff*. Limusa Wiley, México.
- (2007): *El paradigma de Ackoff. Una administración sistémica*. Limusa, Wiley.
- Angyal, A. (1977): *A Logic of Systems*. Ver Emery, Penguin Modern Management Readings.
- Aracil, J. (1978): *Introducción a la Dinámica de Sistemas*. Alianza Editorial.
- Aristóteles: *De Caelo*. Ver Stokes, J. L.
- (1975): *Metafísica*. Edit. Espasa-Calpe, S.A., Madrid, octava edición.
- Ashby, R. (1972): *Introducción a la cibernética*. Ediciones Nueva Visión, Buenos Aires.
- (1972): *Introducción a la cibernética*. Ediciones nueva visión, Buenos Aires.
- Asimov, I. (1979): *Breve historia de la química*. Alianza Editorial.
- Bacon F. (1984): *Novum Organum*. Ediciones Orbis, S.A.
- Barberousse A., Bonnay D., Cozic M. (2011): *Précis de Philosophie des sciences*. Vuibert.
- Beishon, J. (1972): *Systems Behaviour*. The Open University Press.
- Bergmann, Gustav (1971): *Filosofía de la ciencia*. Estructura y función, Edit. Tecnos, Madrid.
- Bertalanffy, L. Von (1973): *General Systems Theory*. Penguin Books.
- (1974): *Robots, hombres y mentes*. Edic. Guadarrama, segunda edición.

- Bertalanffy L. Von, et al (1978): *Tendencias en la Teoría General de Sistemas*. Selecc. de G. J. Klir, Alianza Universidad.
- Billari Francesco, Fent Thomas, Prskwetz Alexia, Scheffran Jürgen (2006): *Agent-Based Computational Modelling*. Physica-Verlag.
- Bly, A. (2010), compilador: *Science is Culture*. Harper, perennial.
- Bogdanov, A. (1921, 1980): *Essays in Tecktology*. Traducc. George Gorelik. The Systems Inquiry Series.
- Boulding, K. (1956): *General System Theory: The Skeleton of Science*. Management Science, p.197-208).
- Brafman, O. y Pollack, J. (2013): *La necesidad del caos*. Empresa Activa.
- Braithwaite, R.B. (1965): *La explicación científica*. Edit. Tecnos, S.A., Madrid.
- Braun, W.(2002) : *The System Archetypes*, en www.uniklu.ac.at/~gossimit/pap/sd/wb_sysarch.pdf.
- Brigman, P. W (1950): *Reflections of a Physicist*. Philosophical Library, N.Y.
- Broad, C.D. (1963): *El pensamiento científico*. Editorial tecnos S.A. Madrid.
- Buchanan, Mark (2002): *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Science of Networks*. W. W. Norton & Company.
- Burrell, G. y Morgan, G., (2009): *Sociological Paradigms and Organizational Analysis*. Ashgate, reimpresión.
- Campbell, N.R. (1967): *Las leyes numéricas y el uso de las matemáticas en la ciencia*. Ver Newman. Edit. Grijalbo, S.A.
- (1967): *Medición*. (En Newman) Edit. Grijalbo.
- Capra, F. (1999): *La trama de la vida*. Seg. edición, Editorial Anagrama, Barcelona.
- Capra, F & Luisi P. L. (2014): *The Systems View of Life*. Cambridge University Press.
- Chalmers, A.F. (2009): *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* Siglo XXI editores, 24ª impresión.
- Changeux J. P., Ricoeur P. (1999): *Lo que nos hace pensar. La naturaleza y la regla*. Edic. Península, Barcelona.

- Checkland, P. B. (1971): *A systems Map of the Universe*. Journal of Systems Engineering, 2,2.
- (1988): *Soft systems methodology. An overview*. Journal of Applied Systems Analysis, 15, 27-30.
- (2000): *Soft Systems Methodolgy: A Thirty Years Retrospective*. Systems Research and Behavioral Science, 17, P. S11-S58.
- Checkland, P. B., Scholes, P. (1990): *Soft Systems Methodology in Action*. John Wiley and Sons.
- Checkland, P. B., Holwell, S. (1998): *Information, Systems and Information Systems*. John Wiley and Sons.
- Churchman, C.W. (1976): *El enfoque de sistemas*. Edit. Diana, México.
- Comte, A. (1980): *Curso de filosofía positiva (lecciones 1 y 2). Discurso sobre el positivismo*. Ediciones Orbis, S.A.
- Conde, G. A. (2014): *Comentarios sobre las ideas de caos y complejidad, su génesis, su desarrollo y actualidad*. Escuela de Estadística U. Valle, Colombia.
- Conte, S.D. (1965): *Elementary Numerical Analysis*. McGraw-Hill Book Company.
- Curlee, W. & Gordon R. L. (2011): *Complexity Theory and Project Management*. John Wiley & Sons.
- Descartes, R. (1983): *El discurso del método*. Edic. Orbis, S.A.
- Diamond, Jared (2006-a): *Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*. Random House Mondadori, S.A.
- (2006-b): *Armas, gérmenes y acero*. Random House Mondadori, S.A.
- Dubois & Prade (1980): *Fuzzy sets and Systems: theory and applications*. Academic Press.
- Emery, F.E.(1976): *Systems Thinking*. Penguin Modern Managament Readings.
- Enache, Răzvan (2015): *La sociedad como máquina autopoiética*. Niklas Luhmann. Conferencia Doctorado Ciencias Ambientales Unicauca, U.T.P., Univalle.

- Espinoza, M.: en <http://pagesperso-oranage.fr/miguel.espinoza/> pg. 1-2.
- Ferrater Mora, J. (1994): *Diccionario de Filosofía*. Editorial Ariel, S.A., Barcelona.
- Feyerabend, P. K. (1975): *Contra el método*. Edit. Ariel.
- Feynman, Richard P (2010): *El carácter de la ley física*. Metatemas, Tusquets edit. 3ª edic.
- Forrester, J.W. (1968): *Principles of systems*. Text and Workbook, Chapters 1 through 10. Second preliminary Edition. Wright-Allen Press, Inc.
- (1971): *World Dynamics*. Wright-Allen Press, Inc.
- Frankfort, H. y H.A., Wilson J.A., Jacobsen T. (1974): *El pensamiento prefilosófico*. Fondo de Cultura Económica, terc. Reimpr.
- Galison, Peter (2005): *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré*. Drakontos, Colección Crítica.
- Gall, J. (1978): *Systemantics*. Pocketbooks.
- Gibbons, M., Limoges, C., Nowotry, H., Schwartzman, S., Scott, P. and Trow, M. (1994): *The New Production of Knowledge: The Dynamism of Science and Research in Contemporary Societies*. Sage, London.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K.G. (2005).: *Simulation for the Social Scientist*, Sec. Edit., Open University Press.
- Gould, S. J. (2010): *Érase una vez el zorro y el erizo*. Drakontos, bolsillo.
- Gratzer, W. (2002): *Eurekas y Euforias. Cómo entender la ciencia a través de sus anécdotas*. Crítica, Barcelona.
- Greenwood, J.D. (2011): *Historia de la psicología. Un enfoque conceptual*. Mc. Graw Hill.
- Gribbin, J.(2007): *Así de simple*. Drakontos, Crítica.
- Guzmán, M. de et al. (1993): *Estructuras fractales y sus aplicaciones*. Ed. Labor.
- Hall and Hagen (En Litterer, 1969): *Definition of System*.
- Halliday D., Resnick R. (1963): *Physics. For students of Science and Engineering*. Wiley.

- Häuberer, Julia (2011): *Social Capital Theory. Towards a Methodological Foundation*. VS research.
- Hewitt, P. G. (2004): *Física conceptual. Novena edición*. Pearson, Addison Wesley.
- Heylighen F., Joslyn C. (2001): *Cibernetics and second order cybernetics*. R.A. Meyers (edit), Academic Press, N.Y.
- Holland, J.H. (2014): *Complexity. A very short introduction*. Oxford, University Press.
- Holton, G. (1975): *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Edit. Reverté.
- Jackson, M.C. (2000): *Systems Approaches to Management*. Kluwer Academic, Plenum Publisher.
- Jackson, M.C. and Keys P. (1984): *Toward a System of Systems Methodologies*. J. Opl. Res. Soc., 35.
- Jager R. (1995): *Fuzzy logic and control*. Tesis doctoral, univ. De Delft, Holanda.
- Jenkins G.M. (1969): *The Systems Approach*. Journal of Systems Eng., Univ. Of Lancaster, Vol. 1, No.1.
- Johnson, Neil (2009): *Simply Complexity. A clear guide to Complexity Theory*. Oneworld, Oxford.
- Kant, E. (1984): *Crítica de la razón pura*. Tomo 1. Ed. Orbis S.A.
- Kassner E., Newman J. (1987): *Matemáticas e imaginación*. Edic. Orbis S.A.
- Kauffman, Stuart A. (1995): *At home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*.
- Kleinfeld, J. (2002): *The Small World Problem*. Society, jan/Feb. 2002.
- Klir, G. (1978): *Tendencias en la Teoría General de Sistemas*. Alianza Editorial, Madrid.
- (1985): *Architecture of Systems Problem Solving*. Plenum Press. New York, London.

- Koyré, Alexander (1988): *Estudios de historia del pensamiento científico*. Siglo XXI editores, novena edición.
- Kuhn, T. (1975): *La estructura de las revoluciones científicas*. F.C.E. México.
- Lakatos, I & Musgrave, A. (1975): *La crítica y el desarrollo del conocimiento*. Grijalbo, Barcelona.
- Lange, O. (1975): *Los "todos" y las partes. Una teoría general de conducta de sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Laplace, Pierre Simon (1951): *A Philosophical Essay on Probabilities*. Dover publication Inc.
- Laszlo, E. (1972): *Introduction to Systems Philosophy*. Harper & Row, Publishers.
- Litterer, J.A. (1969): *Systems, Control and Adaptation*. John Wiley and Sons, Inc.
- López, J.M.: *Husserl y la Psicología. Consideraciones entorno al saber de la Psicología en Husserl*. Correspondencia interna UTP, programa filosofía.
- Lovett Cline, Barbara (1973): *Los creadores de la nueva física*. Breviarios, Fondo de Cultura Económica, México.
- Luhmann, N. (1995): *Social Systems*. Standford Univesity Press.
- Maldonado, C.E. (2009): *Exploración de una teoría general de la complejidad*. En *Complejidad: Revolución científica y teoría*. Editorial Universidad del Rosario, Colombia.
- Malthus, T. (1998): *An essay on the principle of population*. Electronic Scholarly Publishing Project, <http://www.esp.org>.
- Mandelbrot, B.B. (1987): *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Ed. Tusquets.
- Maturana, H. R. (2004): *Desde la biología a la psicología*. Edit. Universitaria Lumen, cuarta edición.
- Maturana H, Varela F. (2003): *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano*. Edit. Universitaria Lumen.

- Maynard, H.B. *Comp.* (1963): *Industrial Engineering Handbook*, second edition, McGraw-Hill Book Company Incorporation.
- Meadows, D. *et al.* (1972): *Los límites del crecimiento*. Fondo de cultura económica, Mexico.
- (1992): *Beyond the limits*. Chelsea Green Publ. Comp., Vermont.
- Meadows, D. (2009): *Thinking in Systmes. A Primer*. Earthscan.
- Miller, G.A. (1968): *The Psychology of Communication*. Allen Lane, the Penguin Press, London.
- Mitchel, Melanie (2009): *Complexity. A guided Tour*. Oxford University Press.
- Mitleton-Kelly, Eve, compilador (2003): *Complex Systems and Evolutionary Perspectives on Organizations. The application of Complexity Theory to organizations*. Pergamon, Elsevier Science Ltd.
- Monod, J. (1971): *El azar y la necesidad*. Monte Avila Editores, C.A.
- Monroy, C. (1998): *Teoría del Caos*. Alfaomega grupo editor, Bogotá, Colombia.
- Morris, Charles G. y Maisto, Alberta A. (2001): *Psicología*. Pearson education, décima edición.
- Nagel, E. y Newman, J. (1970): *La demostración del teorema de Gödel*. Edit. Tecnos, Madrid.
- Newman, J.R. (1967): *Sigma: el mundo de las matemáticas*. Edit. Grijalbo.
- Ossa C.A. (2000): *Conceptos fundamentales sobre conjuntos difusos*. Rev. Ciencia et Technica, U.T.P. Año VI, No. 13.
- (2002-a): *Álgebra lineal. Programación lineal*. Univ. Tecnológica de Pereira.
- (2002-b): *Simulación básica*. Univ. Tecnológica de Pereira.
- Palacios A., Luis Carlos (2009): *Ingeniería de métodos: movimientos y tiempos*. Ecoe Ediciones.
- Papineau, D. (2008): *Filosofía*. Blume.

- Pékelis, V.: *Pequeña enciclopedia de la gran cibernética*. Editorial Mir, Moscú, 1977.
- Penrose, R. (2002): *La mente nueva del emperador*. Fondo de cultura económica, México.
- Peter, L and Hull R. (1970): *The Peter Principle*. Bentam Books.
- Philip J. Davis, Reuben Hersh (1989): *El sueño de Descartes. El mundo según las matemáticas*. Editorial Labor, S.A. España.
- Phillips, D.C. (1971): *Systems Theory. A discredited Philosophy*. Ver schöderbeck P. P.).
- Pickover, Clifford A. (2009): *De Arquímedes a Hawking*. Crítica, Barcelona.
- Poincaré, H. (1905): *Science and Hypotesis*. Walter Scott Publishing Co.
- (1914): *Science and Method*. Thomas Nelson and Sons.
- (1958): *The value of Science*. Dover Publications.
- Popper, K. (1968.): *The Logic of Scientific Discovery*. Harper Torchbooks, sec. Edit.
- (1991): *Conjeturas y refutaciones*. Edic. Paidós.
- Priante, A. (2006): *El silencio de Goethe o la última noche de Schopenhauer*. Cahoba, ediciones.
- Prigogine, Ilia & Stengers, Isabelle (1984): *Order out of Caos*. Bantam Book.
- (2004): *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Alianza Editorial, Madrid.
- Rapoport, A. (1968): *Mathematical Aspects of General Systems Analysis*. Ver J. A. Litterer.
- Reale, G. y Antiseri, D. (1999): *Historia del pensamiento filosófico y científico*. Herder, Barcelona, tercera edic.
- Reichenbach, H. (1971): *The direction of Time* (edit. M. Reichenbach) University of California Press.
- Resnick, Mitchel (2000): *Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Microworlds*. MIT press.

- Richmond, B. y Peterson S. (2000): *An introduction to Systems Thinking*. High Performance Systems Inc.
- Roldán É. (2014): Irreversibility and Dissipation in Microscopic Systems. Doctoral Thesis accepted by Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2014. Springer.
- Roldán J., Y. Ben-Dov, G. Guerrero (2004): *La complementariedad: una filosofía para el siglo XXI*. Programa Editorial, Univ. Del Valle.
- Roldán, J. (2014): *Exergía, anergía*. Universidad del Valle, Colombia.
- Saunders, P. T. (1983): *Una introducción a la teoría de catástrofes*. Ed. Siglo Veintiuno.
- Schiff, Joel L. (2008): *Cellular Automata. A discrete View of the World*. Wiley Interscience.
- Schöderbeck, P. P. (recopilador) (1971): *Management Systems*. John Wiley and Sons, Inc.
- Schrödinger E. (1975): *¿Qué es una ley de la naturaleza?* Fondo de cultura Económica.
- (2009): *Ciencia y humanismo*. Tusquets, Metatemas. 3ª edición.
- Senge, P. (1992): *La Quinta Disciplina: El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Ed. Granica.
- Senge, P. et al. (1995): *La Quinta Disciplina en la práctica*. Ed. Granica.
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949): *The mathematical Theory of Communication*. Urbana, University of Illinois Press.
- Simon, H.A. (1979): *La Arquitectura de la complejidad*. Ver Simon, *Las ciencias de lo artificial*. Edit. ATE.
- (1979): *Las ciencias de lo artificial*. Edit. ATE.
- Skyttner; Lars (2005): *General Systems Theory. Problems, Perspectives, Practice*. World Scientific, 2nd. Edit.
- Smith, Leonard: (2007): *Chaos. A Very Short Introduction*. Oxford University Press.

- Sokal, Alan (2010): *Más allá de las imposturas intelectuales*. Ciencia, filosofía y cultura. Edit. Paidós.
- Sokolnikoff, I. SS, Redheffer, R. M., 1958: *Mathematics of Physics and Modern Engineering*. McGraww-Hill, Book Company, Inc.
- Stewart, Ian (2007): *¿Juega Dios a los dados?* Drakontos, bolsillo, Edit. Crítica, Barcelona.
- Stokes, J.L. (1922): *Aristóteles. De Caelo*. Oxford University Press.
- Sussman, M.V. (1972): *Elementary General Thermodynamics*. Addison-Wesley.
- Swinborne, R. (1976): *La justificación del razonamiento inductivo*. Alianza Universidad, Madrid.
- Taber, C. S. y Timpone, R. J. (1996). *Computational modeling. Quantitative applications in the social sciences 113*. Sage, Thousand Oaks ; London. (Op. Cit. en Gilbert & Troitzsch (2005)).
- Von Foerster, H. (2003): *Understanding Understanding*. Springer –Verlag.
- Warfield, J. N. (2006): *An Introduction to Systems Science*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Watts, Duncan J. (1999): *Small Worlds. The Dynamics of Networks...* Princeton Univ. Press.
- Woodcock A., Davis M. (1980): *Catastrophe Theory*. Avon Books.
- Wooldrige, M. (2002): *An introduction to Multiagent Systems*. John Wiley and Sons Ltd.
- Wulff, H.R., Pedersen, S.A. & Rosenberg R. (2002): *Introducción a la Filosofía de la medicina*. Triacastela, Madrid.
- Zadeh, L.A. (1965): *Fuzzy sets and systems*. Proc. Simps. Systems Theory Politech Inst. Brooklyn.
- (1965): *Fuzzy Sets*. Information and Control, vol. 8, No. 3, June.

Revistas:

Journal of Industrial Engineering & Management.

Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science

General Systems Yearbook.

International Journal of General Systems.

Systems Research and Behavioral Science.

Systems Research. The Official Journal of the International Federation for Systems Research.

Systemic Practice and Action Research,

Journal of the Operational Research Society.

Isss Conference Proceedings (International Society for the Systems Sciences).

General Systems Bulletin.

Complexity.

Journal of Systems Science and Complexity.

Índice

A

- Aceleración 37, 486, 487; caída libre, 486; definición, ; gravitacional, 86, 487; uniforme, 47.
- Ackoff 109, 150, 154, 155, 158, 160, 165, 172, 184, 312, 346, 425, 435, 439, 493; pensamiento analítico y sistémico, 308; planeación interactiva, 327.
- Acoplamiento(s); de elementos activos 178, 503; en retroalimentación 180; entre entradas y salidas 503; entre sistemas 181; estabilidad del sistema 180; estructura del sistema 178; ley de 133, 135; matriz de 178, 179, 503; red de 179; resultado del 179.
- Acto(s); autónomos 155; de respuesta 155; de un sistema 155; reactivos 155.
- Administración; concepto de 115; del sistema 323; enfoque analítico, enfoque sistémico, 421; estilos de 316; uso de analogías 110; y clima organizacional ; y complejidad 284; y cuasidescomponibilidad 183.
- Agrupamiento; coeficiente de, 267; de un grafo, 267, 543.
- Aislamiento 85; característica de la ciencia clásica, 301; de un sistema, ; en el péndulo de Galileo, 183; y experimentación, ; y la ciencia analítica, 101, 102; y la teoría de la complejidad, 218; y la T.G.S., 217.
- Ambiente del sistema 125, 127, 133, 139, 145, 158, 160, 192, 196, 217, 244, 355, 500, 501; intercambio de energía, 506; metodología de Forrester, 350; metodología de Jenkins, 338; (n), 155, 350; programación lineal, 336; y adaptabilidad, 305; y auto-organización, 283; y comportamiento complejo; y el enfoque de sistemas, 317; y emergencia sistémica, 283; y las estructuras disipativas, 292.
- Ámbitos 48, 69, 79, 166.
- Amor; fuerzas del sistema social, 289; ¿medición del?, 423; y lenguaje, 289; y solidaridad, 290.
- Análisis; cualitativo, cuantitativo, 240; de la intervención, 382; de los tres cuerpos (n), ; del sistema, 339, 340; del sistema político, 385; del sistema social, 384; Dos, 373, 385; matemático. Ley de los graves, 480; Tres, 373, 385; uno, 373; Uno, 384; y síntesis, 32.
- Analogía(s); con el origen de la vida, 275; e isomorfismo, 110; entre complejidad dura y blanda, ; para la energía de trabajo, 507; qué son, 110; y experimentación, 39.
- Angyal 213; definición de sistema. 213.
- Animismo 26.
- Anomalías 47, 55, 58, 63, 64, 78, 79.
- Antilogaritmo 535.
- Antimultitud; Teoría de la multitud-antimultitud, 257.
- Apalancamiento 402, 413, 419.
- Aprendizaje 123, 145, 243, 288, 290, 312, 366, 367, 368, 381, 388, 395, 469, 495; metodología de, 364.
- Aracil 349.
- Aristóteles 31, 38, 51, 96, 100, 130, 256, 314, 460, 465, 480; caída de los graves, 37, 38, 97, 480; el holismo griego, 96, 103; en la Edad Media, 97; la emergencia sistémica, 130; peso infinito, 37; refutación de la caída de los graves (n), 97; teleología, 157; tipos de causas, 31; y el vacío, 481; y la lógica, 460, 465, 466; y los sistemas lógico deductivos, 51.
- Arquetipos sistémicos; crecimiento y subinversión, 418; desplazamiento de la carga, 406; erosión de metas, 409; escalada, 413; éxito para quien tiene éxito, 415; límite del crecimiento, 402; pensamiento sistémico, 402, 420; qué son, 402; soluciones contraproducentes, 411; tragedia del terreno común, 416.
- Arquímedes 47.
- Ashby 104, 127, 130, 131, 139, 140, 142, 147, 172.
- Asimov 108.
- Astronomía: 41.
- Atractor(es); comportamiento territorial, 245; de Lorenz, 233; duplicación del número de, 231, 237; qué es, 231; redes booleanas, 278; teoría del caos, y de catástrofes, 243; y fractales, 236.
- Auto-catalíticas 283; reacciones químicas, 283; redes, 275.
- Autómatas celulares 261.
- Autoorganización 146, 152, 197, 198, 220, 221,

- 222, 274, 283, 288, 290, 309, 315, 500, 501.
- Autopoiesis 136, 284, 309.
- Autoregulación; en Boulding. 153; propiedades emergentes. 287; y calidad de información, 287.
- Autosimilitud 237, 536.
- Axiomas 53, 61, 149, 172; definición (n), 51; de la teoría de probabilidades (n), 209; e hipótesis, 60; ejemplos de, 52; quinto postulado de Euclides. 474; silogismo, 33; sistema de Peano, 473; tautología, 36; teorema de Gödel (n), 51; y deducción, 36, 51, 123; y matemáticas, 34, 52, 60, 61.
- Axiomática 57.
- B**
- Bacon F. 300.
- Barberousse A., Bonnay D. 72.
- Beishon J. 441.
- Belousov-Zhabotinsky 274.
- Bénard; giro a la derecha o a la izquierda, 288; inestabilidad de, 197; y la auto-organización, 288.
- Bergmann G. 166.
- Bergson; el élan vital, 256; y el "élan vital", .
- Bertalanffy L. Von 110, 112, 143, 144, 149, 173, 185, 187, 229, 495; limitaciones de la teoría en forma de E.D.O., 180; y el enfoque clásico de la ciencia, 103; y la filosofía de sistemas, 117; y la investigación tipo dos, 304; y la SGSR, 110; y las matemáticas en la T.G.S., 172, 495; y las metodologías funcionalistas, 311; y la T.G.S., 103, 116, 136, 437, 444; y sistemas abiertos, 112.
- Bifurcación: 232; en la curva de Koch, 237; teoría del caos y teoría de catástrofes, 243; y autocatálisis, 283; y teoría de catástrofes, 241; y umbral crítico, .
- Billari F., Fent T., Prskwetz A., Scheffran J. 262, 264.
- Biología 37; carácter científico de la, 73; la ley del "todo o nada", 122; molecular, 443; teórica, 223; y el organicismo, 91; y experimentación, 40; y la ciencia tradicional, 103, 217; y la genética molecular, 64; y la TGS, 116, 402; y los sistemas complejos, 287; y reduccionismo, 87, 88; y sistema abierto, 112; y taxonomía, 488; y teoría de catástrofes, 242.
- Bit; definición, 203; variedad obligada, 127.
- Bly A. 82, 170.
- Bogdanov 172.
- Bohr 248, 250, 468, 469.
- Boltzmann 206, 519, 520; reversibilidad, 206.
- Bosque industrial; enfoque analítico, enfoque sistémico, 423; modelo de dinámica de sistemas, 432.
- Boulding K. 153, 161, 184; clasificación de sistemas, 150; jerarquización de sistemas, 151; y la práctica de los modelos de sistemas, 153; y la SGSR, 110.
- Brafman O., Pollack J. 550.
- Braithwaite R. B.; prueba o refutación completa de una teoría, 59; y la inferencia inductiva, 36.
- Braun W. 402.
- Brigman P. W. 82.
- Broad C.D. 71.
- Browniano 519, 520.
- Buchanan M. 219, 279, 548.
- Burrell y Morgan 308, 328.
- C**
- Caída libre; componentes de la, 86; deducción de la ecuación, 487; deducción de la ley de, 123, 486; ley de la, 57; y el plano inclinado, 37.
- Calor; definición de, 189; medición del, 190; y temperatura, 189; y trabajo, 112.
- Cambios; en el tiempo absoluto de Newton, 458; factibles y deseables, 312, 387, 429; hereditarios, 66; moderados ante cambios en las C.I., 278; propuestos por las metodologías, 300; sugeridos por modelos mentales, 379; y consenso, 373; y cosmovisiones (Weltanschauungen), 387; y evolución, 273.
- Campbell N. R. 168, 169.
- Campos 246.
- Cantidad de movimiento 485.
- Cantor; conjunto de, 231, 234; conjuntos transfinitos, 226.
- Caos; definición, 525; organizado, 294.
- Capital Social 286.
- Capra F. 136, 198, 250; orden y desorden, 197; patrón y estructura, 115; relojes químicos, 198; sostenibilidad ecológica, 314; y el acercamiento a la verdad, 30; y la hipótesis

- Gaia, 159.
- Capra y Luisi 61, 65, 87, 136, 247, 443.
- Carga; capacidad de, 533; desplazamiento de la, 406; emocional, 396; en un condensador, 483.
- Carnap; lenguaje objeto, metalenguaje, 55; veracidad de una hipótesis, 57; y la definición de entropía, 193.
- Carnot; ciclo de, 191, 511; ciclos reversibles, 514; máquina térmica, 190, 191.
- Catástrofes, Teoría de; elementales (siete), ; ¿pseudociencia?, 239; qué es, 239, 241; y teoría del caos, 243.
- CATWOE; ejemplo, 427; ¿Qué es?, 377, 378; y actividades mínimas del modelo conceptual, 379; y la definición raíz, 377, 378; y modelo conceptual, 393.
- Causa 472.
- Causación 41.
- Causalidad; bases de la, 348; concepto de ley, 42; contrafactual 470; Descartes y la C. directa, 222; determinismo y, 469; diagramas causales, 347, 348, 349; ecuaciones diferenciales y la, ; en Kant, 22; explicación de un hecho, 347; indeterminista 470; lazos de retroalimentación, 348; negativa, 350; objetos de existencia real, 26; positiva, 349; principio de, 31, 41, 42, 469; secuencia de los fenómenos, 157; tabla de las categorías, 462; y juicio, 461; y relaciones lineales, 43; y tiempo, 471.
- Causas; Aristotélicas, 31; diversas y universalidad, 469; eficientes y finales, 37, 157; eficientes y Galileo, 91; eficientes y mecanicismo, ; finales, 91, 103; futuras, 157; genéticas y ambientales, 469; pensamiento científico y las, 27; y linealidad, 44.
- Centralización; concepto matemático, 498; en la T.C. 222; ley sistémica, 125; progresiva y complejidad, 499; y descentralización, 126; y el modelo de O. Lange, 180; y mecanización, 135.
- Chalmers A.F.; falsación en Popper, 77.
- Changeux J. P., Ricoeur P. 443, 550.
- Checkland P.B. 150, 172, 185, 253, 299, 327, 346, 363, 365, 380, 387, 394, 435, 450, 494; acción investigativa interpretativa, 305; clasificación de, 161; enfoque epistemológico de los sistemas, 379; metodología de, 371, 421, 425, 429; sistemas duros y blandos, 164; y la ingeniería de sistemas, 363; y los sistemas con propósito, 368; y los sistemas de la actividad humana, 164.
- Churchman C.W. 316, 317, 318, 319, 321, 322, 363, 454; ideas sobre sistemas, 318.
- Cibernética; clásica y de segundo orden, 147; de segundo orden 146, 147, 309; de sistemas blandos, 312; ley de la totalidad, 134; organizacional, 311, 326; origen de la, 346; y administración, 395; y complejidad, 73, 117, 223; y el acoplamiento de partes, 133; y el nuevo enfoque de la ciencia, 217; y la metodología de Forrester, 331; y la propuesta de Lange, 181; y organización, 146; y retroalimentación, 143, 346; y sistema abierto, 143; y TGS., 146.
- Ciclo(s); de Carnot, 191, 511; de Carnot y entropía, 193; en relación a un atractor, 278; longitud de los, 278; patrón de repetición de, 278; positivo, 350; repetitivos y la segunda ley de la termodinámica, 274; reversible, 514; reversible y cambio de entropía, 515; ruta más larga, ; sistémico de aprendizaje, 366; sucesión de C. de Carnot, 514; y la máquina térmica, 191; y retroalimentación, 44, 102.
- Ciencia(s); blandas, 74; características generales de la, 32; clásica y de sistemas diferencias, 421; clasificación de las, 69, 73, 75; construcción del conocimiento, ; cuáles son, 72; definición de, 21, 74, 78, 82; de las redes,; de los sistemas, 116, 136, 326; divisiones de las, 304; duras, 74; e hipótesis, 60; e inducción, 36; empíricas, 34, 60, 70, 72; empíricas y formales, 37; éxitos, ; experimentación, 38, 96; extraordinaria, 79; filosofía de la, 71; física, 459; formalización de la, 55; fracasos,; históricas, 41; humanas, 67; importancia de la historia en la, 81; límites de la, 70; método, 30, 46, 81; moderna, 458; normal, 79; objetividad de la, 300; procedimiento tradicional, 85; progreso de la, ; pública, 45; según Popper, 74; sociales, 67; tradicional y ciencia de los sistemas, 127; vocabulario común, 116; y aislamiento del fenómeno, ; y convenciones, 57; y criterios de veracidad, 57; y el principio de falsación, 77; y especialización del conocimiento, 73; y experimentación, 37, 40; y filosofía, 70; y matemáticas, 170; y objetividad, 25, 28; y principios, 57.
- Ciencia y humanismo 118, 444.

- Científico; actividad del, 78; administrador, 321, 324; carácter C. de la T.G.S., 437, 444; características del pensamiento, 445; conocimiento, 21, 24, 25, 27, 28, 36, 37, 45, 213, 311; conocimiento (pensamiento), 26; desarrollo del conocimiento, 76; descubrimiento, 46; enfoque de sistemas, 317; estado positivo o, 39; hechos de interés para el, 88; método, 21, 46, 56, 83; origen del término, 70; pensamiento C. y visión del mundo, 46; procedimiento, 83; proceso, 81; procesos del conocimiento, 46; saber (conocimiento), 31.
- Clasificación; de fenómenos, 149; de las ciencias, 22, 69, 73, 74; de las leyes, 166; de las teorías sociológicas, 308; de los sistemas, 150, 158, 161, 164; y teoría, 150.
- Clave Morse; e información, 201.
- Clima; "Climax Design", 448; efecto mariposa, 425; modelo inicial de Lorenz, 232; organizacional, 101, 427; predicción del, 127, 128.
- Climatología 41.
- Coevolución; definiciones, 288; y adaptación, 288; y aprendizaje e información, 288; y empoderamiento, 288; y teoría de la complejidad, 283.
- Colisión; entre dos esferas, 485.
- Como si 279; teoría científica y el, 56.
- Complejidad; áreas de investigación, 284; áreas relacionadas con la C., 223; aumento de la, 235; definición(es), 137, 221, 222, 284; dinámica, 139; en las ciencias naturales y en las humanas, 422; en redes, 138; grado de C. en un sistema, 273; medidas de la, 223; origen de la, 274; posibilidad de una teoría de la C., 137; problemas filosóficos, 137; ¿Propiedad de un sistema?, 137; reducción de la, 140; Teoría de C. y los propósitos del sistema, 402; y arquetipos sistémicos, 402; y cuasidescomponibilidad, 182; y el enfoque de Luhmann, 182; y el principio de incompatibilidad, 207; y el proceso en un sistema, 142; y emergencia sistémica, 217; y estructura del sistema, 141; y la matemática clásica, 207; y los sistemas sociales, 44, 102, 142; y orden, 290; y organizaciones, 366; y redes, 542; y reduccionismo, 86; y reductibilidad sistémica, 136; y seres vivos, 284, 287; y tamaño del sistema, 140.
- Complejo; comportamiento, 285, 286; definición, 286; multidimensionalidad, 286; número, 236; número (n), 236; orden, en la teoría del caos, 236; plano, 236; sistema, 137, 140, 142; definición, 181; ¿funciona? 450; orientado por la técnica o por el problema, 302; sistema adaptativo, 290; sistema. Definición, 137, 224; sistema social, 289; sistema, y administración, 284; teorema de la indeterminación funcional, 451; y complicado, 139.
- Comportamiento(s); aleatorio de una ley exponencial, 272; animal, territorialidad, 244; auto-organizado, 222; clasificación de sistemas de acuerdo al, 155; complejo, 285, 286; complejo, qué es, 155; control del, 155; del mundo sublunar, 97; de los genes, 91; del todo y de las partes, 179; egoísta, 222; emergente, 222; en psicología, 155; exponencial, 272; fractal, 222; humano, leyes del, 91; intencional, 139; intencionado, 158, 494; predicción del, 139.
- ; reactivos, 518; responsivos, 518; y arquetipos sistémicos, 402; y complejidad, 140; y espacio de fase, 496; y jerarquización, 439; y matriz de transformación, 180; y medidas de actuación, 360; y normas, 384; y proceso, 140; y reductibilidad, 140.
- Computación; máquina de Turing, 220; modelos de, 341; y la teoría de la complejidad, 223.
- Comte A. 39, 73, 304, 314; división de las ciencias, 304; ley de los tres estados, 39; leyes generales, 73; sociología, 39; y la ciencia física, 39; y las ciencias naturales y sociales, 39.
- Conde, G. A. 525, 551.
- Condiciones iniciales 226; determinismo, 196, 441; el problema de los tres cuerpos (n), 126; entropía, 126; equifinalidad, 124; estado de equilibrio, 197; Poincaré, 527; teoría del caos, 231; y determinismo, 93.
- Conectividad (interconectividad); coevolución, 283; complejidad, 282; en los sistemas complejos, 282; grado de interacción, 282.
- Conjunto(s); clásicos, 206; de Cantor, 231, 234; de estados esenciales, 128; difuso, 207; definición, 207; difusos, 206, 208, 440, 520; nítido(s), 207, 523; posibilísticos, 524; probabilísticos, 524; teoría de, 207; universal, 520; variedad obligada, 127.
- Conocer 29, 39, 117, 457, 458, 460.

Conocimiento 222; intuitivo, 23.

Conocimiento(s); aproximaciones al, 30; axiomas, postulados (n), 52; científico, 24, 28, 46, 76, 82, 445; correcto (Descartes), 86; del mundo, 461; e intencionalidad, 366; empírico, 459; empirismo, racionalismo, 457; especializado, 100; formas de, 22; holístico, 102; inicio del, 366; integral, ; límites, 29; matemático, 60; nuevo y la deducción, 33; objetividad, 311; objetivo, 26; objetos de (n). 25; por experiencia, 23; por tradición, 24; principios, convenciones, 57; ¿Qué es?, 222; revolución copernicana del, 459; tipos de, 23; verdadero, 26, 27; vertical, transversal (Klir), 74; y aprendizaje, 366; y ciencia, 70; y experiencia, 457, 459; y facultades en la Edad Media,; y razón, 457, 460; y sentidos, 460.

Consenso; y acuerdos, 373; y puntos de vista, 364.

Constructo mental 90, 106, 190, 218, 312, 367, 379, 423, 433, 438, 442, 539.

Conte S.D. 526.

Conversación; cohesión en los sistemas sociales, 290; y la metodología de Checkland, 385.

Conway 262.

Cosa-en-sí 70.

Crecimiento; controlado, 176; de la entropía, 518; en el "juego de los botones", 274; en Maslow, 67; explosivo (pequeño mundo), ; exponencial, 174; geométrico, ; ilimitado, 174; isomorfismo, 116, 174; isomorfismo (n). 174; lazo de retroalimentación positiva, 399; ley del (Gall), 447; limitado (n). 229; límite del, 403; poblacional, 67, 229; reforzador, 403; teoría del caos, 229; tipos de, 151; y subinversión, 418.

Crick; y el ADN, 47.

Críticas; a la filosofía de sistemas, 438; a la T.G.S., 437; al concepto de sistema, 441; de D.C. Phillips, 437; de Galileo a Aristóteles, ; de Gall, 445; vertientes C. de la T.G.S., 314.

Cualidades; inmanentes, 214.

Cualitativo(s); aspectos C. de la ciencia antigua, 37; cambios, en las estructuras disipativas, ; carácter C. de las leyes físicas, 121; criterios C. y objetivos, 343; en la teoría de catástrofes, 239, 240, 245; y cuantitativo, un balance, 293.

Cuantificación; medición, 168; y teoría de catástrofes, 245.

Cuantitativo(s); modelo C. y las metodologías funcionalistas, 310; modelo C. y las metodologías interpretativas, 312.

Cuasidescomponibilidad; delimitación del sistema, subsistemas y ambiente, 307; ¿Por qué existe?, 183; un regulador del sistema, 184; y aislamiento, 183; y complejidad, 183; y el concepto de familia, 183; y grado de complejidad de un sistema, 224; y jerarquización, 181; y la comprensión del todo, 439; y la práctica del enfoque de sistemas, 442; y regulación (n), 140.

Cultural(es); aspectos C. en la corriente lógica, 373; aspectos C. y la sistemicidad, 367; corriente C. en la MSB, 373, 381; dimensiones y la multidimensionalidad, 286; el mundo de los símbolos, 117; fenómenos, 69; patrones C. en la T.G.S., 219; sistemas sociales y, 162, 163.

Curlee, W. & Gordon R.L. 551.

D

Darwin; el origen de las especies, 93; irreversibilidad de los procesos de la vida, 94; Selección natural, 94.

Dato(s); causalidad, 348; complejidad estática, 138; recolección e información y, 343; teoría del caos, .

Decoherencia; en la administración, 291; entramado (entrelazamiento), 290; mecánica cuántica, ; teoría de la complejidad, 290.

Deducción; definición, 33; de la caída libre, 486; formalización de la matemática, 51; Popper, 74; proceso deductivo, 33; silogismo, 34; suma de componentes, 21; y conocimiento, 32; y emergencia sistémica, 131; y leyes, 171; y tautología, 36.

Deductivo; carácter de las matemáticas, 51; leyes deducidas, 123; proceso, 33; proceso lógico, 52; proceso y demostración, 53; razonamiento D. y silogismo, 440; razonamiento D. y teorías formales, 52.

Definición(es); de sistema complejo, 137; de sistemas, 105; dificultad de las, 52; ejemplos, 53; en la ciencias naturales, 57; investigación, 150; leyes, 122; matemáticas, 52; operacionales, 171; raza pura, 63; y principios, 57.

Definición raíz; CATWOE, 377; estructural

- ra, 378; holones, 379; qué es, 375, 377; y análisis del sistema social, 384; y diseño, 387; y jerarquía sistémica, 378; y modelo conceptual, 379; y transformación, 377.
- Demoras; lazos de retroalimentación, 397; qué son, 142; y complejidad, 402.
- Descartes R. 86, 90, 91, 100, 222, 443; segundo y tercer principio del "Discurso", 88; separación mente-cuerpo, 91; y el espíritu de la época, 46; y el reduccionismo, 88; y la teoría de la complejidad, 222.
- Descentralización; en la T.C. 221; ley sistémica, 180; y complejidad, 125; y la administración moderna, 257.
- Descomponibilidad; sistema jerárquico, 181.
- Desorden; confusión (n), ; e ignorancia, 206, 518; e irreversibilidad, 519; metodologías post-modernas, 314; ¿u orden en el mundo?, 517; y cantidad de información, 206; y energía, 193; y entropía, 204, 517; y no equilibrio, 197; y orden, 197; y sistemas organizados, 440; y teoría del caos, .
- Determinismo; bases del, ; estadístico, 470; genético, 65; limitaciones, 470; newtoniano, ; restricciones al, ; y causalidad, 469; y condiciones iniciales, ; y reversibilidad, 92.
- Diagramas; causales, 140, 347, 348, 349; causales, el lenguaje de los sistemas, 350; causales en la quinta disciplina, 397; causales. Lectura de los, 403; causales y demoras, 402; causales y estructura, 400; causales y sistemas complejos, 397; de Euler, 466; de flujo, 337; de Forrester, 351, 353; de proceso, 490; de sistema abierto, 338; semiótica y, 57.
- Diálogo; en la MSB, 340; y discusión, 396.
- Diamond J. 40, 257, 291, 445; experimentación natural, 40; fragmentación de los sistemas, 291; ¿Por qué Europa y no China?, .
- Dibujo; base de la discusión, 381; enriquecido, 372, 381; enriquecido y el análisis del sistema social, 384; enriquecido y el análisis Uno, 373; ilusiones ópticas, 134; representación de estructuras, 141; y visión sistémica, 372.
- Difracción 539, 540.
- Dimensión; de homotecia, 536; espacial diez, teoría de las cuerdas, 56; espacio euclidiano, 536; fractal, 534, 536; fractal, curva de Koch, ; fractal y complejidad, 224; histórica, 288; política, 385; tercera, 332.
- Dinámica; complejidad, 138, 139; de la información en redes, ; de la resiliencia, ; de las ecuaciones teoría del caos, ; de los cuerpos, ; de los proyectiles, ; de los sistemas, 105; de sistemas, 305, 311, 326, 346; de sistemas blandos, 395; de sistemas, lazos de retroalimentación, 356; económica y cuasidescomponibilidad, 183; en series divergentes, 527; interacción, sistema abierto, 144; newtoniana, tres leyes principales, 301; programación, 332; sistema oscilatorio, 482; social, 39; y termodinámica, 196.
- Disipativas; estructuras, 197, 519; estructuras y auto-organización, 197; estructuras y bifurcación, 199; estructuras, y complejidad, 284.
- Disipatividad; y sistemas complejos, 283.
- Dominio; dimensional y lógica sistémica, ; emocional. 290; personal (La quinta disciplina), 395; personal, qué es, 395; y evolución, 288.
- Dubois y Prade 520.

E

- Ecología 41.
- Economía; arquetipos sistémicos, 402; fallas en cascada, ; fallas en el enfoque reduccionista, ; fijación de precios, 123; hipótesis de D. Ricardo, 67; ley de la oferta y la demanda, 121, 122; objetos de la actividad humana 26; refutación de una hipótesis (Nash), 68; sistema dinámico (Boulding), 151; y la ley de Pareto 80-20, 122; y la teoría de catástrofes, 243; y la teoría del caos, 229; y la T.G.S., 136, 284; y los métodos de la ciencia analítica, 40; y reduccionismo, 217.
- Ecuación; normalizada, 533.
- Ecuaciones diferenciales; definición de sistema, 496; estudio del clima, 232; flujos y niveles, 354; leyes sistémicas, 495, 500; movimiento de dos cuerpos, 526; principio de causalidad, ; reduccionismo, 302; sensibilidad a las condiciones iniciales, 441; sistema de Bertalanffy, 172, 173; solución, 227; y la matemática del continuo, 239.
- Edad; Media, 97; Media y educación, ; variable lingüística, 524; y conjuntos difusos, 209; y relaciones difusas, 521.

Efecto mariposa 228.

Eficiencia de una máquina 190, 192.

Einstein; experimentos mentales, 468; materia y energía, 506; postulados de la relatividad, 471; revolución científica, 80; tiempo y causalidad, 471; y el principio de Heisenberg, 468; y la intuición, 47; y la simultaneidad, 458, 471; y Poincaré: principios y convenciones, 56.

Elemento(s); activo, 177, 178, 501; activo (n), 177; activos y comportamiento del sistema, 179; activo y matriz de acoplamiento, 178; activo y retroalimentación, 180, 503; centralizador, 135; centralizador y administración, 317; coordinador y centralización, 125; del sistema, E. del ambiente, ; fundamental de la complejidad, 221; fundamental en la ciencia, ; grado de pertenencia (conjunto difuso), 208; líder, 499; mínimo en la TGS y en las redes, 220; protector, 128; protector (regulación), 128; regulador, 130; transmisor de la herencia, 56; y el movimiento de los cuerpos, 95; y la ley del tercero excluido, 211; y Mendel, 63.

Emergencia; de primer, segundo y tercer orden, 131, 285; sistema y razonamiento deductivo, 440; sistémica, 130, 151, 283, 293, 440; sistémica y complejidad, 255; sistémica y complejidad (n), 448; sistémica y silogismo, 440; sistémica y subsistemas, 137; sistémica y trabajo en equipo, 396; y auto-organización, 290; y jerarquización, 181.

Emery F.E. 213.

Emoción; y amor, en los sistemas sociales, 289; y ética en las metodologías postmodernas, 315.

Empirismo; qué es, 457; y la ciencia moderna, 458; y racionalismo, 457; y racionalismo en Kant, 459.

Empoderamiento; y coevolución, 288.

Enache R. 147.

Energía; degradación de la, 505; de trabajo, 507; e información, 288; interna, 506; interna (térmica), 189; libre, 196; libre (n), ; libre y entropía, ; macroscópica de un sistema, 200; negativa, 519; oscura, 223; química, 505; tipos de, 189, 505; total, 189; y calor, 506; y el concepto de equilibrio; y emergencia sistémica, 283; y las estructuras disipativas, 292; y los sistemas disipativos (n), 197; y lucha por la

competencia; y sistema abierto, ; y temperatura (n), 512.

Enfoque de sistemas 102.

Entrelazamiento 250; cuántico y la ciencia analítica, ; qué es, 290; y complejidad, 290.

Entropía; alteración de la, 518; definición, 193, 201, 514; del universo, 517, 519; diferencia en, 514; e ignorancia, 518; e información, 196, 201; e irreversibilidad 515; generación de, 195; máxima, 205, 516; mínima, 126; visión macroscópica, 204; visión microscópica, 204; y complejidad, 223; y desorden, 193; y energía libre, 196; y equilibrio, 113; y estructuras disipativas, 197; y lazo de retroalimentación, 144; y neguentropía, 195; y procesos irreversibles estables, 194; y sistemas abiertos, 113, 127, 144, 195; y sistemas cerrados, 126, 194; y sistemas vivos, 195; y temperatura (n), 126; y teoría cuántica, 199; y trabajo, 193, 515; y trabajo (n), 94.

Epistemología; de sistemas, 117; en Popper, 79; y Kant, 458; y método, 81.

EPR 247.

Equifinalidad; ecuación de la, 500; en Lange, 180; ley de la, 167; ley sistémica, 124; medición de la, 306; y el quinto nivel de Boulding, 152; y lazos de retroalimentación, 145.

Equilibrio; definición de (n), 135; e islas de orden, 283; estado de E. de un sistema, 500; múltiples puntos de, 284; pérdida abrupta del, 241; superficies de, en Teoría de catástrofes, 241; térmico, 194; termodinámico, 189; y disipatividad, 283; y equifinalidad, ; y estabilidad, 135; y estabilidad (Lange), 180; y estado estable, 126; y estructuras disipativas, 197; y la estadística (Boltzman), 199; y no-equilibrio, 197; y organización, 292; y trabajo, 113, 125.

Ergodicidad; equifinalidad, 180.

Espacio; bidimensional, ; de comportamiento, 241; de control, 241; de fase, 241, 496; definición, 57, 71; en Kant, 22; euclidiano, 536; infinito, 477; muestral (n), 209; tiempo, 459, 471; tridimensional, 241; vibracionales (cuerdas), 56.

Espacios en blanco 293.

Especie(s); definición, 489; dimensión histórica, 288; extinción de, 273; Linneo, 141, 489,

- 490; lucha de, 242; origen de las, 93; territorialidad, 244.
- Espinoza M. 239.
- Estabilidad 112, 114; al borde del caos, 293; de Bénard, 197; e información, 160; en sistemas sociales, ; Lange, 180; sistema abierto, 125; tendencia a la, 151; y centralización, 125; y dimensión histórica, 288; y entropía, 127; y equilibrio, 135, 180; y lazos positivos y negativos, 350, 400; y sistemas, 114.
- Estado(s); al borde del caos, 282; cuántico, 199; de equilibrio, 125, 500; de equilibrio (ruptura de simetría), 199; de orden y entropía, 197; de un sistema, definición, 496; entrada-salida,; equifinal (péndulo),; esenciales, 128; estable(s), 124, 194, 501, 509; estable y disipatividad, 283; inestable, ; iniciales, ; primordial (caos) (n),; sistemas que mantienen un, 156; termodinámico, 190; tres E. de Comte, 39.
- Estructura(s); administración, 163; auto-organización, 283; definición, 45; del sistema (Lange), 178; de redes,; disipativas, 197; e isomorfismos, 110, 114, 483; familia y, 115; fractales, ; gen, 151; jerárquica,; matemática, 110; modificación de la, 114; niveles y flujos, 353; patrón, proceso y, 114; pensamiento lineal, 45; pensamiento no lineal, 45; siete (René Thom), 241; sistemas acoplados y, 181; y complejidad, 141; y cuasidescomponibilidad, 183; y definición nominal, 115; y lazos de retroalimentación, 143; y procesos, 114; y sistemas blandos, 164; y sistemas duros, 164, 332.
- Euclides; ángulos del triángulo, 477; quinto postulado, 61; Riemann, Lobachevski, 474.
- Evento(s); actos, 155; causales, ; comportamiento del sistema, 155; del sistema, del ambiente, 154; en probabilidades (n), 209; iniciales, 156; memoria de un, 288; simultáneos, 458, 471; y teorías científicas, 444.
- Evolución; adaptabilidad, 287; civilización, 27; co-evolución, 288; Darwin, 93; de las sociedades, 498; del concepto de ciencia, ; del pensamiento sistémico, 326; del sistema nervioso, 498; e irreversibilidad, 94; en los sistemas (Simon), 181; en redes, ; predicción de la, 93; y complejidad, 283; y la ley 1/f, 273; y T. de catástrofes, 242.
- Experimento(s) 30, 32; corroboración de hipótesis, 32, 36, 62; crucial, 37; de Milgram, ; de reversibilidad, 518; de Torricelli, 461; de Torricelli (n), 32; El juego de los botones, 273; en las ciencias humanas, 38, 40; en sistemas complejos, 104; fundamentos de un, 71; grupos auto-administrados, 292; mental, 37, 61; causalidad, 348; entropía creciente, 193; mentales. 468; mental (n), 38; natural, 40, 41; ruptura con el pensamiento antiguo, 37; y aislamiento, ; y azar, 48; y las leyes numéricas derivadas, 170; y la veracidad de una teoría, ; y los conceptos científicos, 71; y metodologías, 303; y teoría, 48.
- ## F
- Facultades; cognitivas, 29; departamentos y, 100; mentales y conocimiento, 366; sensoriales y racionales, 460; Universidad siglo XIII, 99.
- Fallas; en cascada, ; en la comunicación, 345; en redes, ; razonamiento en Einstein, 468.
- Familia; análisis, síntesis, 24; ciencias naturales, 39; clasificación según Ackoff, 160; clasificación según Boulding, 153; conocimiento intuitivo, 23; cuasidescomponibilidad, 183; definición de, 115; enfoque orientado por el problema, 302; enfoque reduccionista, 87, 88; enfoque sistémico, 103; experimentación, 38; herencia en la, 63; leyes sistémicas en la, 135; modelo de una, 90; padre de F., elemento regulador, 129; patrón, estructura, proceso, 115; sistema aislado, 302; sistema cerrado, sistema abierto, 113; sistema de la actividad humana, 26; subsistemas, 135; taxonomía de Linneo, 489, 490; tipos de, 20, 115; ¿un sistema? 20; y las clasificaciones de Ackoff, 160; y las clasificaciones de Chekland, 164, 165.
- Fases; del individuo (Comte), 39; de una metodología, 308; metodología de Jenkins, 338, 339; siete F. metodología de Chekland, 370; transición de, 242, 274.
- Fechner; psicofísica, 91; Weber, ley estímulo-respuesta, 121.
- Ferrater Mora 55, 459, 465.
- Feyerabend P.K. 15, 74, 84; concepto de ciencia, 80.

Feynman R.P. 34, 56, 61, 170, 518, 552; matemáticas y física, 34, 170; y el orden, ; y la irreversibilidad, 518; y las leyes de la física, 61.

Filosofía; de general de las ciencias, 71; particular de las ciencias, 71.

Finalidad 41.

Flujos; conexión entre, 354; dinámica de sistemas, 351, 352; ecuaciones de, 356; identificación de, 354; parámetros, variables auxiliares, 352; turbulentos y orden, 197; y canales de información, 352; y la estructura de un sistema, 353; y lazos de retroalimentación, 354; y niveles, 354; y parámetros, 353.

Formalización; de Bertalanffy, 173; de la ciencia, 55; de la ciencia, escollos, 58; de la matemática, 51, 54, 60; de las Ciencias Sociales, 68; de la T.G.S., 134, 149; de una teoría, 149; de un lenguaje, 55; y deducción, .

Forrester J.W. 16, 17, 160, 331, 346, 361, 397, 432, 435; diagramas de (cursogramas), 351; diagramas de F. en las organizaciones, 397; dinámica de sistemas, 311, 346; dinámica de sistemas: software, 356; metodología de, 351; modelos de sistemas sociales, 160; tasas y flujos (n), 352.

Fotosíntesis 43, 44.

Fourier; ley de, 190, 508.

Fractal(es); antenas, 238, 538; como elemento descriptivo, 237; conjunto de Julia, 236; curva de Koch, 235; curvas de Julia, 237; definición de, 234; dimensión, 534; dimensión de homotecia, 536; dimensión F. como medida de la complejidad, 224; dimensión F. de la curva de Koch, ; formación de poros, 237; geometría, 234; grado de resolución, 237; invarianza en la escala, 270; paisajes, 238; patrón repetitivo, 236; recta de Cantor, 231; teoría de, 60, 117, 223, 234, 238; y ADN, 237; y atractor extraño, 236; y autosimilitud, 536; y bifurcación, 237; y complejidad, 237; y la ley $1/f$, 273; y la naturaleza, 237; y la T.C., 220; y teoría del caos, 236.

Fragmentación 257.

Frankfort, H. y H.A., Wilson, Jacobsen. 27.

Franklin Rosalind; y el ADN, 47.

Fril; lenguaje difuso de computación, 524.

Función; de la ciencia, 72; del sistema y los subsistemas, 338; de pertenencia, 209, 210,

523; depuración del lenguaje, 55; de riesgo, 344; expandida de la entropía, 195; objetivo, 327, 332, 333, 364; y diseño, 109; y diseño (n), 94; y estructura, 115; y matemáticas, ; y mecanicismo, 94; y medidas de actuación, 317, 319; y propósito, 106; y sistema, 105, 107; y sistemas complejos (Gall), 448; y sistemas determinados, 159.

Funiculus; y la presión atmosférica, 463; y las esferas de Magdeburgo, 464.

G

Gaia 159.

Galileo; Causas eficientes, 37; Concepto de resolución, 85; Discorsi e dimostrazione...; péndulo de, 19, 20; péndulo de, clasific. Ackoff, 160; péndulo de, clasific. Boulding, 153; péndulo de, clasific. Checkland, 164, 165; planos inclinados, 37; y Aristóteles, 37; y el concepto de aislamiento, ; y el ppio. de superposición, 122; y la caída de los graves, 38; y la cuasidescomponibilidad, 183; y la equifinalidad; y los sistemas cerrados, 112; y los sistemas de referencia (n), 459; y reduccionismo.

Galison P. 56, 458.

Gall J. 445, 447, 448, 449, 451, 452, 453.

Gas; equilibrio de un, 91; expansión e irreversibilidad, 518; expansión libre, 515; ideal, ciclo de Carnot, 191; moléculas en 1 cm. cúbico, 206; presión de un, 90, 121; sistema aislado, 111; temperatura de un, 512; temperatura y presión, 347; termostato de, 488; y el ciclo de Carnot, 512; y el ejemplo de entropía, 204; y la metáfora social de Locke, 91; y leyes físicas, 121.

Gause; principio de, 244.

Gen; comportamiento lineal, 65; definición, 222; dominante, 63; hipótesis, 56; las leyes de Medel, 63; qué es, ; recesivo, 63; y herencia, 63; y raza pura, 63.

Geología 41.

Geometría; como lenguaje matemático, 90; de Riemann, de Lobachevsky, 476; equivalencias de las, 477; fractal, 234; palabras indefinidas, 53; por repetición (fractales), 220; reglas de operación, 53; teoría, 58; teoría, y el holismo griego, 95; y formas de la naturale-

za, 234; y las artes liberales, ; y sistemas lógicos deductivos, 51.

Gerald; y la S.G.S.R., 110.

Gestalt 134, 213.

Gibbons M., Limoges, Nowoty, Schwartzman, Scott, Trow 304.

Gilbert, N. 552.

Gould S.J. 70, 117, 118, 131, 214, 300.

Grado; de camaradería, 543; de un nodo, 276.

Grado de pertenencia; al conjunto "joven", 209; al conjunto "viejo", 210; conjuntos difusos, 208; intersección de dos conjuntos difusos, 523; unión de dos conjuntos difusos, 523; valores del, 208.

Grafos; definición, 265; mediciones en los, 266; Teoría de, 264; tipos de, 265; total conexiones grafo no dirigido, 266.

Gratzer W. 47.

Graves; caída de los G. y aislamiento, 101; caída de los G., y Aristóteles, 480; comportamiento teleológico, 97; ecuación, caída libre, 121; ley de la caída de los, 111; más pesados, caída, 97.

Greenwood J.D. 469.

Gribbin J. 199, 234, 269, 519, 533.

Grupos; afectados (stakeholders), 381; atracción gravitacional y orden, 519; auto-administrados, 292; (clusters) en redes, ; de materia concentrada, 519; interdisciplinarios, 302; oprimidos, 313.

Gutenberg; Richter, terremotos. 269.

Guzmán M. et al 237.

H

Haldane 441; definición de sistema, 441.

Hall and Hagen 495.

Halliday D., Resnick R. 508, 512.

Häuberer J. 286, 552.

Heisenberg 220, 468, 469.

Heliocéntrica; teoría, 33, 58, 95.

Herencia; de la ciencia analítica, 43; formalización de la teoría, 62; un "como si", 56; y "caracter", 63; y gen, 56, 63; y

sangre, 62.

Hewitt P.G. 193, 471, 506, 538.

Heylighen & Joslyn 146.

Hierón; y Arquímedes, 47.

Hiparco; modelo geocéntrico, 59; y el planeta Mercurio, 59.

Hipótesis; C. Lombroso, 68; de la herencia, 62; de la metodología de Sistemas blandos, 365; de nivel superior, 56; D. Ricardo, 67; e inferencia deductiva, 36, 56, 123; e inferencia inductiva, 36; en las ciencias humanas (ejemplos), 67; en las ciencias sociales, 39; inferencia inductiva, 77; investigación tipo 2, 303; kantiana (Gall), 452; Maltus, 67; mendelianas (herencia), 63; Nash, 68; presión atmosférica (Linus), 463; puntos de partida, 61; Torricelli, 32, 465; verificación, 56, 57, 59, 468; y axiomas, 60; y causalidad, 349; y ciencia privada, ; y ciencia pública, ; y convención, 57; y creatividad, 46; y el concepto de ley, 121; y experimento, 32, 36, 37, 40, 60; y la T.G.S., 149, 172; y método científico, 46, 56; y principios, 57.

Holismo; en la Edad Media, 97; etimología (n), 95; griego, 95.

Holístico(a); conocimiento, 102; enfoque estructuralista, 327; enfoque H. y las universidades modernas, 101; retorno al enfoque, 102; visión, 103.

Holland J.H. 107, 221, 255, 553.

Holones; y definición raíz, 379; y sistemas, 379.

Holton G. 45, 85, 107, 122, 485, 486.

Homeostasis; y retroalimentación, 143.

Homotecia; dimensión de, 536.

Horror; al vacío, 461.

I

Ideales; búsqueda de, 109; casos I. en Teoría de catástrofes, 241; fenómenos I. y cuasidescomponibilidad, 307; modelos, 90; objetos, 26, 69.

Incompatibilidad; principio de, 207.

Índice; de medida de actuación, 319; de Miller, 183.

- Individualidad; en los sistemas complejos, 282; y naturaleza, 27.
- Inducción; circularidad, 76; definición, 33; e investigación, 46; en Popper, 74, 79; inferencia inductiva, 36; por eliminación, 76; proceso básico del conocimiento, 32; y leyes de definición, 122; y leyes empíricas, 122; y nuevo conocimiento, 33, 34; y probabilidad, 76.
- Inestabilidad; de Bénard, 197; máquina de Zee-man, 241; teoría de catástrofes, 241.
- Información; algorítmica, 223; calidad de la, 287; canal de, 354; canal de I. niveles y flujos, 352; contendio (medida) de la, 202; definición, 201; equiprobable, 203; lazo de retroalimentación, 144; medida de la cantidad de, 203; objeto existencia real, 26; sistema abierto, 144; Teoría de la, 201, 202, 520; transmisión de la, 112; unidad de, 203; y adaptación, 288; y complejidad, 223, 224; y desorden, 206; y entropía, 201, 518; y neguentropía, 196; y sistemas sociales, 288.
- Instituto Santa Fe; sistemas complejos, 218.
- Integración; centralización, 125; de conocimientos, 101; estabilidad, 125.
- inteligencia; de un sistema 320.
- Inteligible 23.
- Intención; capacidad de decisión, 159; en filosofía, 157.
- Intencionado(s); comportamientos, 158; propósitos, 158; sistema 109, 145, 147, 157, 290; y sistemas animados, 158; y sistemas determinados, 158; y sistemas sociales, 158.
- Intencional; propósito, 157; sistema, 109, 145, 157; y sistemas determinados, 159.
- Interconectividad; y coevolución, 283; y complejidad, ; y sistemas complejos, 282.
- Interdisciplina; concepto, 74; concepto (n), 305; Klir, 74.
- Interdisciplinarios(a); ambiente, 218; estudios I. y la T.G.S., 104; grupos, 302; Jackson, 305; métodos, 73.
- Interrelación; de las partes, 103, 125, 133; de niveles y flujos, 354; emergencia e, 136; entre observadores, 147; proceso-estructura, 114; suma como, 132.
- Intuición; conocimiento directo, 23; en Poincaré, 527; y administración, ; y espacio finito, 477; y la investigación científica, 46, 47; y la teoría de catástrofes, 239; y razonamiento (Poincaré), 35.
- Invariancia; en la escala, 270; en la medición, 169; en las propiedades, 169; y método, 30.
- Investigación; activa, 305; científica, 31, 40; corriente basada en la cultura, 380; corriente basada en la lógica, 374; de operaciones, 105, 305, 311, 312, 326, 331, 344; de operaciones (n). 363; en la acción, 305; en las ciencias sociales, 39, 308; inaccesibilidad a la, 70; modos de, 328; proyecto de I. (Gall), 448; razón y fe, ; teórica, 150; tipo 1, 303; tipo 2, 303; tipo 3, 304; tipo 4, 305; tipos de, 293, 299; y ciencia privada, 48; y creatividad, 47; y la teoría de la complejidad, 284; y lengua objeto, 55; y método, 31, 32, 45, 46, 81.
- Irreversibilidad; carácter de, 194; explicación de Boltzmann, 206; y entropía, 514; y evolución, 94; y Feynman, 518.
- Irreversible(s); procesos, 94, 194, 195, 516, 518; reacción, 144; termodinámica, 188.
- Isomorfismo(s) 111, 114; crecimiento, 151; entropía e información, 204; qué son, 110, 114; y analogía, 111; y arquetipos sistémicos, 402; y la ciencia de los sistemas, 116; y la T.G.S., 110; y leyes, 121; y patrón, 114.

J

- Jackson M. C. 299, 305, 308, 313, 326.
- Jager R. 553.
- Jenkins G. M. 311, 326, 331, 337, 339, 340, 341, 342, 346, 361, 363; metodología de, 311, 326, 337; y las metodologías blandas, 363.
- Jerarquización; conceptos matemáticos, 499; crítica a la, 439; en Boulding, 151; en el péndulo de Galileo, 135; en la familia, 135; ley de la, 132; y ambiente del sistema, 133; y complejidad (n), 451; y cuasidescomponibilidad, 181; y emergencia sistémica, 181.
- Johnson N. 221; fundamentos de complejidad, 221.
- Juego de la vida 262.
- Juego(s); de la vida, ; de los botones, 273, 275; en computador, ; multitud-antimultitud, ; reglas del, 286, 292; sin expectativa óptima, ; teoría de, 332.
- Juicio(s); epistemológico, 457; ontológico, 457; tabla de los, 461.

Julia; conjunto de, 236; curvas de, 237; fractales, 235.

K

K; grado de entrada de una red. 276; redes de orden. 278; y el comportamiento de una red. 278.

Kant E. 31, 42, 89, 314, 322; categorías. 461; conocimiento. ; el empirismo y el racionalismo. 459; revolución copernicana del conocimiento. 459; sentidos y razón. 460; y la causalidad. 31; y la epistemología moderna. 458; y las metodologías emancipadoras. 313.

Kassner & Newman 477.

Kauffman S. 223, 277, 283, 286, 288, 297, 544; biología teórica. 223, 273; juego de los botones. 273; origen de la vida. 274, 275; redes aleatorias booleanas. 276; redes de orden K. 278; y la coevolución. 288.

Kleinfeld J. 280.

Klir G. 74, 149, 172, 311; interdisciplina. 74, 305; reconstruibilidad del sistema. 183; y la T.G.S. 149.

Koch, curva de; bifurcación. 237; dimensión. 537; fractal. 235; longitud. 235.

Koyré A.; descubrimientos y contexto histórico. 46.

Kuhn T. 15, 80, 84, 304; ciencia extraordinaria. 80; ciencia normal. 79; historia de la ciencia. 79; paradigma. 79; y Popper. 80.

L

Lagrange; maximización de la entropía. 516; multiplicadores de. 516.

Lakatos & Musgrave 80.

Lange O. 16, 108, 172, 177, 181, 185, 250, 304, 338, 347, 501; elemento activo. 177; equifinalidad. 180; equilibrio, estabilidad. 180; formalización de la T.G.S. 180; límites a la teoría de. 180; modo de acción de un sistema. 179; procesos ergódicos. 180; y la jerarquización. 181.

Lanzamiento horizontal; constructo mental. 90.

Laplace P.S.; determinismo. 93.

Laszlo E. 131; emergencia sistémica. 131.

Lenguaje matemático; abstracción de los fenómenos. 171; depuración del. 55; lenguaje

ideal. 82; y la complejidad. 187; y las leyes de la física. 169; y lenguaje de la física. 58; y teoría científica, 121.

Ley 1/f 268, 271; (n) 122; ruido rosa 272.

Leyes; clases de, 42; contrastación de, 61; de definición, 122; deducidas, 123; del caos, 283; del comportamiento humano, 91; del intelecto, 460; de los sistemas, 121, 176, 180, 445; de Newton y circuito RCL, 482; empíricas, 122; hipótesis, 61; invarianza en la medición, 169; isomorfismos, 111, 116; naturales, 91; numéricas, 166, 169; postulados de Einstein, 471; qué son las, 121; reversibilidad, 92, 518; sistema de Peano, 474; sistémicas y matemáticas, 496; tipos de, 122; tres L. de Newton, 301; y evolución, 283; y la causalidad, 470; y lenguaje matemático, 169, 170; y orden, 517; y principios, 61; y teleología, 103; y teoría, 122, 171.

Líder 296; elemento L., 499; en la metodología de Jenkins, 341; en la T.G.S., 126; y el enfoque anárquico de la administración, 317; y la administración moderna, 396; y la T.C., 296.

Liderazgo; y visión compartida, 396.

Límite; crecimiento sin, 176, 399; de la complejidad, 274; del crecimiento, 174, 229, 403; de una especie, 489; facultades cognitivas, 29; más allá del, 406; y cuasidescomponibilidad, 183.

Lineal(es); coeficientes, 503; comportamiento L. y genes; ecuaciones, 333, 500; función, 332, 500; pensamiento, 42, 101; programación, 305, 327, 331, 336; relación (dependencia), 44; sistema, 213.

Linealidad; causalidad, 43; matemática y, 44, 218.

Lingüística; variable, 524; variables L. lenguajes y gramáticas difusas, 524; y fractales, 238.

Linneo; categorías, 488; clasificación de, 490; taxonomía, 488; y complejidad, 141.

Linus; funiculus, 463; y esferas de Magdeburgo, 464; y Torricelli, 465.

Litterer J.A. 495.

Lobachevsky; y el quinto postulado de Euclides, 61, 474, 476, 477, 478.

Localidad; característica de un sistema complejo, 283.

Locke; enfoque mecanicista en sociología, 91.

Logarítmica; escala de Richter, .

- Logaritmo(s); cálculo de una potencia, 535; cambio de base, 535; concepto, 535; definición, 535; de un número, 535; propiedades, 535; y dimensión fractal, .
- Lógica; bivalente, 207, 213, 440, 522; como lenguaje, 37; corriente basada en la, 373, 374, 386, 387; cuántica, 220; deductiva, 36; de las relaciones, 213; de los sistemas, 213; del todo, 213; difusa, 211, 220, 440, 522; inductiva (Popper), 76; objetos ideales, 26; polivalente, 212, 522; profundidad, 223; reduccionista (n), 448; simbólica, 465; sistémica, 212; tradicional, 211, 213, 522; y las ciencias formales, 37; y reglas del cálculo, 34; y silogismo, 466.
- Logística; ecuación, 175, 534.
- longitud; promedio de ruta, 542.
- Longitud; cualidad inmanente, 214; curva de Koch, 235, 237; definición operativa, 107; del caucho, 131; de ruta, ; de un ciclo (red booleana), 278; promedio de ruta, ; propiedad extensiva, 511; propiedad fundamental, 168; propiedad medible, 167.
- López J.M. 74.
- Lorenz; atractor de, 233; ecuaciones del clima, 232; modelo corrientes de aire, ; y la teoría del caos, .
- Lorenz Edward 228.
- Lovelock; y Gaia, 159.
- Lovett Cline B. 468.
- Luhmann N. 309, 310.
- Luisi; y la hipótesis Gaia, 159.
- M**
- Maldonado C.E. 221; posibilidad de una teoría de la complejidad, 221.
- Malthus T.; alimento y población, 67.
- Mandelbrot B.B. 170; dimensión fractal, 536; formas de la naturaleza, 234; geometría fractal, 234; series de Julia, 235.
- Máquina térmica 191; ciclo de Carnot, 191; eficiencia, 190, 192; perfecta, 191; qué es, 190; real, 192.
- Marco conceptual; el enfoque de sistemas, 315; hipótesis y, 303; metodologías, 302; problemas a considerar, 304.
- Mariposa; efecto, 233.
- Matemática; como lenguaje de la ciencia, 61.
- Matemática(s); administración y, 316; axiomas, postulados, 52; carácter deductivo, 51; ciencia formal, 37; ciencia y, 72; contraejemplos, 53, 58; definiciones en, 52; del continuo, 239; de los sistemas, 187; demostración y, 53; depuración del lenguaje, 54; difusa, 524; ecuaciones M. de los niveles, 356; en la T.G.S., 220; formalización, 51, 54; Gödel y las, 51; isomorfismos, 110; lenguaje de la ciencia, 149, 150, 170; lengua objeto, 55; leyes sistémicas, 496; meta-lenguaje, 55; no lineal, 197; nuevas teorías, 117; patrón y, ; reglas de cálculo, 34; simulación, 220; teoría de la complejidad, 445; términos indefinidos, 52; veracidad y, 57, 61; y el mundo real, 60, 171; y la física, 34; y la naturaleza, 95, 171; y la teoría de la complejidad, 220; y mundo real, 60; y sistemas complejos, 522.
- Materia y energía 247.
- Matriz; de acoplamientos, 178; de transformaciones, 178; estructural, 179.
- Maturana H. 152, 284, 288, 289, 310.
- Maturana & Valera 275, 285.
- Maynard H. B. 492.
- Meadows D. 107.
- Meadows D. et al. 406.
- Mecánica cuántica 146, 157, 204, 223, 245, 290, 468, 541.
- Mecanicismo 226.
- Metabolismo 320.
- Metafísica; y ciencia, 72, 81; y filosofía, 70; y teoría de catástrofes, 239.
- Metodología(s) 41, 299; de la ciencia, 299; en las ciencias sociales, 308.
- Método(s); científico, 46, 56, 70, 73, 83; conceptos generales, 301; Discurso del, 86; empíricos, 69; en la ciencia, 45, 81; en las ciencias sociales, 89; experimental, ; interdisciplinarios, 73; metodologías, M. y técnicas, 299; reduccionista, 104; y metodologías y los tipos de investigación, 303.
- Micromundos; sistemas de, .
- Miller G. A. 183.
- Mitchel M. 66, 90, 217, 220, 222, 264, 442.

Mitleton-Kelly E. 260, 282, 284, 285, 287, 290, 294.

Monod J. 124.

Monroy C. 229.

Morris & Maisto 122.

Multitud; véase antimultitud, .

Multitudes 258.

Mundos pequeños 279, 542.

N

Nagel E. 134.

Nagel & Newman 60.

NetLogo 220.

Newman J. R. 60, 169, 473.

Newton; caída de los cuerpos, 47; causa eficiente, 157; concepto de tiempo en, 458; definición de fuerza, 222; determinismo, ; equilibrio dinámico, 191; física de, 30; gravitación universal, 47; ley de la caída libre, 123; ley de la inercia sistémica (Gall), 452; leyes de, 19; leyes de definición, 122; leyes del universo, 190; mecanicismo, 90; primera ley del movimiento, 112; Principios matemáticos, 90; reduccionismo, 301; reversibilidad del tiempo, 191, 479; revolución científica, 80; simetría temporal, 479; tipos de investigación, 303; y el péndulo, 135.

Nicolis & Prigogine 285, 298.

Nivel; de competencia (desde la Teoría de Catástrofes), 244; de discusión, 458; Definición, 351; definición raíz y jerarquía, 378; de inferencias y emergencia sistémica, 131; de resolución, 429; ecuación de, 356; energético y estado cuántico, 200; ínfimo e hipótesis, 36; ontológico, 457; supremo e hipótesis, 36.

Niveles; afectación entre, 354; conocimiento empírico y, 153; de discusión filosófica, 457; dinámica de sistemas y, 351, 354; energéticos, 201; en la construcción de un modelo, 379; flujo de información y, 354; jerarquización de (Boulding), 151; modelos y, 161.

Nodo(s); autómatas celulares y, 276; centro (hubs), ; concepto de red y, ; conexiones con otros, 276; conexiones más cortas entre, ; conexión y aleatoriedad, 276; daños

en, 270; elemento mínimo de la red, 220; estado de un, 277; falla en cascada y, ; grado de entradas, ; grado de un, ; grado y N. graficación, ; juego de la vida y, ; juego de los botones y, 273; propagación de la información entre, ; redes Booleanas y, 276; resiliencia en redes y, 270; ruptura de conexiones entre, ; ruta más larga, ; ruta más larga y, .

No Euclidianas; geometrías, 61.

No lineal; comportamiento de los genes, ; ecuación poblacional normalizada, 534; enfoque sistémico, 102; estructuras de tipo, 197; interacción N. L. entre elementos, 440; programación, 332; visión, 102, 422.

No linealidad; característica de los sistemas complejos, 282; complejidad, 45, 142, 187, 282, 397, 422; diagramas causales y, 397.

Normas; análisis Dos y, 385; en el proceso de investigación, 79; qué son, 384; roles, valores. 365, 373, 384.

Número; complejo, definición (n), 236; concepto de, 53; concepto e inducción, 35; de distinciones y tamaño de un sistema, 139; de elementos y complejidad, 137, 138, 223; de elementos y cuasidescomponibilidad, 183; de elementos y Miller, 183; de genes, 64; de genes (n), 64; de intermediarios, ; de moléculas de un gas por cm. cúbico, 206; de partes y complejidad, 181; de pasos y profundidad lógica, 223; de pérdidas y ganancias, ; depuración del lenguaje y, 55; de racimos y complejidad, 273; de rectas paralelas a otra recta, 475, 477; de reglas en la ciencia, 81; de teorías, 76; de variables y longitud de un ciclo, 278; de variables y predicción, 93; difuso, 521; logaritmo de un, 535; máximo de preguntas, 202; medición y, 167; relación de orden y, 168; renormalizado, 533; y cuantificación, 168.

O

Objectum; actor pasivo, 146; objetividad y, 25, 27.

Objetividad 25, 27, 28, 29, 305, 311, 421; criterio del conocimiento científico, 22, 27, 28, 311, 421; definición, 26; requisito de la ciencia, 25; visión moderna, 29, 300, 305, 324; y enfoque sistémico, 324; y los ídolos de Bacon, 300; y subjetividad, 25.

Objetivo(s); ciencia moderna y, 239; conflictos entre, 323, 343; conocimiento, 27; de un

- sistema, 318; erosión de metas y, ; función y, 332; medidas de actuación y, 319; sistema intencional y; único, 364.
- Objeto(s); agentes y, 221; aislamiento del, 85; análisis y, 24; autosimilares, ; causa formal y, 31; clases (tipos) de, 69; clasificación de los, 26; comprensión completa de un, 439; conocimiento de un, 167; conocimiento y, 22; de estudio y especialización, 70; definición de complejidad y, 137; fundamental, 88; lenguaje, 55; objetividad y, 29; pensamiento analítico y, 308; ¿qué es?, 25, 26; relaciones entre O. y sistema, 214; relación sujeto, 26, 27, 29; revolución copernicana del conocimiento, 28, 459; sensibilidad e intelecto, 460; tipos de conocimiento y, 23; y Kant, 460.
- Observabilidad; condición de, 459.
- Operaciones; ampliación de las O. aritméticas, 169; definición operativa y, 106; en geometría, 53; formalización de una teoría y, 52; investigación de, 105, 116, 305, 311, 312, 326, 331, 344.
- Orden; autocatálisis y, 283; auto-organización y, 290; caos y, 197; causa del, 290; células de Bénard y, 288; cibernética de segundo, 146, 147, 309; clase y, 489; desorden y, 193, 197, 221; disipación y, 199; emergencia sistémica y, 283; en el mundo, 517; en los sistemas sociales, 287; entropía y, 204, 519; estados de, 197; estructuras disipativas y, 292; islas de, 283; jerárquico, 499; (mandato) y visión compartida, 396; metodologías postmodernas y, 314; no equilibrio y, 197; patrón y, ; primer O. ecuaciones diferenciales, 500; propiedad (relación) de, 423; redes aleatorias booleanas y, 276; redes de O. $K=2$, 278; redes de O. $K>2$, 278; relación de, 168; ruptura del, 288; segundo O. Ecuac. diferenciales, 526; sistemas de O. superior, 181; social, 313; superior, ecuaciones diferenciales, ; taxonomía de Linneo, 489; tendencia al, 198; tendencia al desorden, 519.
- Ordenados(as); a desordenados, sistemas, 519; desordenados, oscilación de estados, 221; islas, 197; mundo, 172; ¿mundo O. o desordenado?, 517; redes, 278.
- Organización; adaptativa, ; administración y, 323; agentes independientes y, 287; aprendizaje y, 395; aumento de la, 145; autonomía individual y, 292; autopoiética, 275; coevolución y, 288; componentes de una, 290; cosmovisiones y, 364; cristales y, 497; definición de, 290; de los sistemas y la T.G.S., 219; del proyecto de un sistema, 340; equilibrio y, 292; formal, 183; informal, 183; la quinta disciplina y la, 397; límite del crecimiento, 403; negociación y, 365; objetivos reales, 318; origen de una, 364; paso al concepto moderno de, 293; principios abstractos, 146; propósitos y, 366; reglas y, 129; regulación y, 129; retroalimentación positiva y, 292; sistema abierto, sistema cerrado y, 276; sistemas complejos y, ; sistema social complejo y, 289; teleología y, ; tragedia del terreno común y la, 416.
- Organizaciones; aprendizaje y, 395; cambios en las, 114; coevolución y, 289; creación de nuevos ordenes, 290; enfrentamiento entre, 413; fragmentación y, 291; hombre-máquina, 337; inteligentes, 395; investigación de operaciones y las, 326; organicismo y, 160; retroalimentación negativa y, 292; sistema abierto y, 317; sistema cerrado y, 317; sistema cerrado y (n), 337; sociales, 152; teoría de la complejidad y, 289.
- Ossa C.A. 333, 524.
- ## P
- Palacios L.C. 425.
- Paleontología 41.
- Papineau D. 470, 472.
- Paralogismo 465.
- Partículas 246.
- Patron; compoejidad y, 219.
- Patrón; catástrofes y, 240; complejidad y, 140; definición nominal y, 115; de territorialidad, 244; de una definición raíz, 378; erosión de metas, 409; estructura, proceso, 114; estructura y, 114; fractales y, 236, 237; interdisciplina y (n), 305; isomorfismo y, 114; ley $1/f$ y, 272; límite del crecimiento, 406; metodologías y, 299; orden y; proceso y, 114; qué es, 114; redes aleatorias booleanas, 278; red y, 114; tendencia a repetir un, .
- PCS; qué es, 382; relación con el PSS, 382; y PSS, 383.
- Peano; dimensión fractal, 536; recta que llena el espacio, 536; sistema axiomático, 473.
- Pékelis V. 145.

- Péndulo; caos y el, ; como sistema, 20; cuasidescomponibilidad y el, 183; de Galileo, 19; ecuación del, 21; equilibrio en el, ; estudio orientado por la técnica, 302; experimentación con el, 38; jerarquización y, 135; ley de la mecanización y, ; modelo ideal, 90; niveles de Boulding y el, 153; objeto de existencia real, 26; propiedad emergente en el, 135; reduccionismo y, 103, 135; sistema aislado, 112; sistema determinado, 160; y la metodología de la física, 301.
- Penrose R. 246, 541.
- Pensamiento; analítico, 308; basado en la imaginación, 39; científico, 27, 36, 46; de sistemas de Barnard, 311; diferencias ciencias naturales y humanas, ; en redes, 117; filosófico, 42; griego, 95, 97; lineal, 45; lineal. Qué es, 43; lineal y sistémico, 42; matemático, 51; principios, 460; razonamiento y, 465; religioso y filosófico, 46; sistemas blandos, 365, 367; sistemas duros, 365, 367; sistémico, 45, 308, 326, 346, 379, 395, 396, 445; sistémico. Qué es, 43; teoría del, 465.
- Pequeño mundo 279; matemáticas de, 542.
- Peter & Hull 446.
- Philip J. & Davis, R. 556.
- Phillips D.C. 437, 438, 440, 441, 442, 444, 453; críticas a la T.G.S., 437.
- Pickover C.A. 76, 170; desarrollo del conocimiento científico, 76; matemáticas y mundo real, 170.
- Planck 540.
- Poincaré H. 33, 89, 234; caos y, ; Caos y, 227; ciencia y elementos básicos, 88; concepto de definición, 105; Einstein y, 56; inducción y, 34; intuición y, 35; los tres cuerpos, ; principios, convenciones, 56; series divergentes, 527; silogismo y, 33.
- Popper K. 15, 41, 74, 76, 84, 444; anomalías y, 80; concepto de ciencia, 74, 78; concepto de verdad, 78; falsación, 76; inducción por eliminación, 76; inducción y, 74; predicción científica, 444; reglas del pensamiento científico, 79; revolución del conocimiento, 80.
- Postulados; de la teoría de probabilidades (n), 209; de la teoría especial de la relatividad, 471; formalización de la T.G.S., 149; leyes deducidas y, 123; leyes y, 121; matemáticas y, 52, 61; qué son, 51; quinto P. de Euclides, 474; validez de los, 123.
- Predicción 41; a priori, 42; ciencia y, 32, 46, 444; complejidad y, 142; del clima, ; en los sistemas de la actividad humana, 445; formalización y, 56; metodología de Jenkins, 343; precisión de datos y, ; y la T.G.S., 444.
- Predictibilidad; condiciones iniciales y, ; emergencia sistémica y, 283; mecanicismo y, .
- Priante A. 22.
- Prigogine I. 190, 195, 196, 197, 283, 285, 519; estructuras disipativas, 197, 519; islas de orden, 283; neguentropía, 195; termodinámica irreversible, .
- Prigogine & Stengers 190, 196, 199.
- Principio(s); antrópico, ; científicos y método, 81; conocimiento científico y, 445; de causalidad, 26, 31, 42, 469; de falsación, 77; de Gause, 244; de incertidumbre, 220, 468; de incertidumbre generalizado (Gall), 447; de incompatibilidad, 207; de indeterminación de Heisenberg, 468; de inducción, 74; de la deducción, 131; de Le Chatelier (Gall), 448; del pensamiento, 460; de nivel superior: la emergencia, 132; de Pascal, 465; de Peter, 446; de razón suficiente, 469; de reversibilidad, 92; de sistemas, 441; de superposición, 122; dinámica de sistemas, 350; ensayo sobre el P. de población (Maltus), 67; generales de la complejidad, ; generales y la ciencia de los sistemas, 116; generales y la T.G.S., 104; leyes de la física y, 61; matemáticos (Newton), 90; metodologías, 299, 302; metodologías sistémicas, 306; métodos y, 301; Poincaré y los, 56; segundo P. de la termodinámica, 113, 519; violación de, 440; y clasificación, ; y el concepto de ley, 121.
- Problema(s); ambientales, 73; arquetipos sistémicos y, 402; de la ciencia, 71; del conocimiento, 459; de los tres cuerpos, 229, 525; dificultad de escoger el, 364; dueño del, 382; duros, 165; en las ciencias sociales, 103; filosóficos de la teoría de la Complejidad, 289; formulación del (Jenkins), 340; hombre-máquina, 338; métodos globales de solución de, 117; o mejor "situación problemática", 366; reconocimiento de un, 371; solución de P. en las organizaciones, 114; subdivisión del, 86; visión lineal y no lineal, 422; visión orientada al, 302; y definición raíz, 377.
- Proceso(s); adiabáticos, 512, 514; autocatalíticos, 283; cambio en los, 114; catalíticos, 274; cibernética y, 143, 146; cinéticos y

- termodinámicos, 144; confiables en el conocimiento, 24, 32; de aproximación y objetividad, 30, 78; de bifurcación, 232; de evolución, 94; de formalización, 54, 56, 149; del conocimiento y fases del mismo, 46; del desarrollo científico, 80; de razonamiento e intuición, 35; de razonamiento en filosofía, 36; de regulación y control, 151; diagramas de, 490; disipativos, ; ergódicos, 180; espontáneo, 196; estructuras y, 114, 163, 219, 292; histórico de la ciencia, 81; inicial de la deducción, 51; irreversibles, 194, 195, 516, 518; isotérmicos, 512, 514; jerárquicos, 326; lógico-deductivos, 52, 53, 56, 104; patrón, estructuras, 114; ¿Qué es un?, 114; reduccionistas, 87; relación, desarrollo, 94; reversibles, 191, 511, 518; revolucionario en la ciencia, 80; sistemas blandos y, 164; sistemas duros y, 164; y complejidad, 142.
- Programación lineal 305, 326, 327, 331, 332, 335, 336, 343.
- Propagación del calor 191, 508.
- Propiedad emergente; véase "Emergencia", 222.
- Propiedades; conjunto de números reales, 53; del todo, 443; intensivas, extensivas, 510; invariantes, 511; medibles, 422.
- Propósito(s) 367, 368; actividad con, 369; cibernética y, 147; ciencias sociales, 366; complejidad y, 366; comunes, 219, 284, 287, 289; definición raíz y, 375, 377, 379; función, ; individuales, colectivos, 222; intencionados, 158, 159, 219; metas, 311; objetivos, 106, 109, 157; sistema intencional y, 157; sistemas con, 373; sistemas de la actividad humana (n), 364; sistemas de la actividad humana y, 162, 164; sistemas determinados y, 159; sistemas sociales y, 160.
- PRUF, lenguaje difuso, 524.
- PSS; relación con el PCS, 383.
- Punto de equilibrio. 431, 433.
- ## Q
- Quadrivium; en la Edad Media, .
- Quinto postulado 61, 474.
- ## R
- Racional; conocimiento científico, 24; desde lo emocional, 289; en la "tragedia del terreno común", 416; expectativa R. y complejidad, ; y los sentidos, 460.
- Racionalismo; empirismo y, 457, 459; qué es, 457.
- Rapoport A. 90, 495; y la SGSR, 110; y la T.G.S., 149, 151.
- Razonamiento; ciencia y, 82; deductivo, 52, 440; en filosofía, 37; inductivo, 35, 36; intuición y, 35; matemáticas y, 34; qué es, 465; reglas ampliadas del, 522; silogismo y, 33, 35, 466; tipos de, 465; validez del, 465.
- Razón suficiente; causalidad y, 469.
- Reacción; a la administración científica, 316; a la causa final, ; BZ, 274; contra el mecanicismo, ; e intencionalidad, 158; en los sistemas determinados, 159; espontánea, 196; irreversible, 144; qué es, 154; sistemas que mantienen un estado y, ; tiempo de, 179.
- Reale y Antiseri 39, 40, 67, 78, 459, 460, 474.
- Realidad; axiomas y, 56; categorías Kantianas y, 462; cognoscible, incognoscible, 25; complejidad y, 73; conocimiento científico y, 25; conocimiento de la, 135; entidad social y, 117; experiencia y, 61; investigación científica y, 70; ley fundamental del trabajo administrativo (Gal), 450; métodos y, 301; modelos mentales y, 396; modelos y, 89, 140, 147, 368; modelos y (n), 29; modelo y R. Fase de comparación, 379; objetividad y, 310; observada, 56, 149; realismo ingenuo y, 23; sistema y, 310, 389, 438; T.G.S. y, 117.
- Redes; aleatorias booleanas, 276, 278; atajos en, 279; booleanas, 220; capilares, 237; ciencia de las, ; complejidad y, ; computacionales, 220; de orde $K=2$, 278; de potencia, ; de reacción, 275; distribución de grados en una, ; eléctricas, ; genéticas reguladoras, ; metabólicas, ; mundo pequeño, ; neuronales, 73, 147, 220; pensamiento en, 117, 223; red de, 219; resiliencia y, 270; teoría de, 302.
- Redes sociales 281.
- Reduccionismo; cuasidescomponibilidad y, 181; debilidad de los ataques al, 443; linealidad y, 218; mecanicismo y, 91, 443; qué es, 87; sistema cerrado y, 112; sistemas duros y, 165; sistémico, 443; T. de la complejidad y, 217, 222; T.G.S. y, 217.
- Reductibilidad 140; complejidad y, 136.

Reflexión 77, 166, 540.

Refracción 166, 540.

Reglas; autorregulación y, 153; de inferencia, 33, 57, 149; de la armonía, 96; de la ciencia clásica, 310; de las matemáticas, 171; del razonamiento, ampliación de las, 522; de manipulación de símbolos, 33; externas, 289; generales, 31, 79, 140; leyes y, 121; metodologías y, 299; método y, 31, 301; organización y, 292; pensamiento científico y, 81, 83; repetición de R. geométricas, 237; teoría de la complejidad y, 219, 221, 274, 286, 315.

Regulación; administración y, 129; de un sistema, 498; estabilidad y, 151, 160; genética, ; reductibilidad y, 140; sistema de, 130.

Regulador; cuasidescomponibilidad como R., 184; de voltaje, ; de Watt, 145; elemento, 129; ideal R. (Popper), 78; principio, 122; qué es, 129; retro y postalimentación, 130; variedad y, 129, 130.

Reichenbach, H. 479.

Reingeniería; pirámide organizacional y, 292; sistemas de la, 115.

Relación; 3:1, en genética, 64; alimento-peso, 348; ambiente-elemento protector, 128; bordes-nodos, 273; caliente (frío)-temperatura, 189; calor cedido-temperatura, 193; causa-efecto, 155, 469; causal, 42; complejidad-no linealidad, 142; de dependencia, 499; de orden, 168; de parecidos entre personas, 522; difusa, 521; dueño-solucionador, 382; en Kant, 461; entrada-entrada, 178; entrada-salida, 178, 502; entre dos elementos, 132; entre interacciones de elementos, 182; entre puntos para definir una recta, 213; estímulo-respuesta, 152; ética-investigación científica, 71; flujo de nacimientos-población, 355; Fuerza-aceleración, 122; hombre-mundo, 117; ley-teoría, 122; lineal, 44; lógica en una definición raíz, 378; masa-volumen, 168; matemáticas y física, 34; materia-energía (n), 111; naturaleza-matemática, 60; necesaria y suficiente, 469; neurona-intensidad de la reacción, 122; no lineal, 44; observado-observador, 146; padre-familia, 129; pesos de sustancias que se combinan, 122; población de ballenas-migración de ballenas, 349; predador-presa, 177, 501; signo-designatum, 57; signo-intérprete, 58; sig-

no-signo, 58; sistema-ambiente, 336, 441; sistema-modelo, 146; sujeto-objeto, 25, 28, 29; temperatura-presión, 347; teoría de sistemas-teoría del control, 346; teoría-metodología-práctica, 303; tiempo-causalidad, 471; tiempo-espacio, 486; trabajo-calor, 190, 192; usuario-palabras-percepción, 299; x a y, causalidad, 42.

Reloj(es); central, 459; función, 109, 159; ingenios mecánicos y, 92; interrelación de partes, 103; metáfora del universo, 92; modificación de la marcha de un, 469; nivel 2 de Boulding, 151; químicos, 198; sincronización de, 458; sistema determinado, 159.

Rendimiento; antenas de alto, 238; computadoras de alto, 116; energético, 505.

Resiliencia 270, 283.

Resnick M. 256, 291; administración moderna y, 292; fragmentación de organizaciones, 291.

Resolución; de problemas (Descartes), 86; en Galileo, 85; grado de, 237; nivel de, 429.

Responsabilidad; autoridad y, 153, 183; coevolución y, 288; del delincuente, 68; delegación y, 322; del observador, 23; descarga de la, 408; en la familia, 135; entidades estatales y, 323; evaluación de la, 322; humana, 73; roles y, 292.

Respuesta; acto de, 155; de un sistema, 155; de un sistema. Qué es, 154; ley estímulo, 121; múltiple. Ley de la, 123; relación estímulo, 152; sistemas determinados y, 158.

Restricciones; del ambiente, 318; del ambiente al sistema, 336; difusas, 212, 522; en la definición raíz, 377; en la programación lineal, 331, 333, 336; en las transformaciones, 370.

Retroalimentación; acoplamiento en, 180; arreglo estructural y lazos de R., 144; autorregulación y, 287; catálisis y lazos de, 283; catalización y, 275; causalidad y lazos de, 348; cibernética y lazos de, 346; complejidad y, 282; complejidad y lazos de, 142; dinámica del sistema y lazos de, 356; emergencia sistémica y, 222; en el pensamiento sistémico, 44; importancia de los lazos de R, 350; lazos de, 349; lazos de R. y cibernética, 143; negativa, 293; negativa. El termostato, 400; negativa. Tendencia a un límite, 401; niveles, flujos y lazos de, 354; positiva, 147, 292, 293; positiva. Crecimiento típico, 399; positivos, lazos de, 350; positivos

- y negativos, lazos de, 142, 355, 397; regulación y, 151; regulación y lazos de, 130; sistema abierto y, 143; sistema cerrado y lazo de, 144; sistema con, 143.
- Reversibilidad 486, 518; de las leyes físicas, 518; determinismo científico y, 92; equilibrio newtoniano y, 191; máquinas térmicas y, 191; qué es la, 92.
- Revolución; científica, 70; científica y paradigma, 79; copernicana, 81; copernicana del conocimiento, 459; permanente en Popper, 80.
- Ricardo, D. 40, 67, 314.
- Richmond, B. & Peterson S. 557.
- Richter, Ch. ; escala de, .
- Riemann 61, 474, 476.
- Roldán et al. 248, 538.
- Roldán J. 507, 538.
- Roles; análisis de intervención, 382; asignación de, 383; autoridad y, 386; en las instituciones, 219, 289, 365; normas, valores y, 373, 384; redefinición de, 292.
- Romanticismo; inicios del (n), 94; reacción al mecanicismo, 94.
- Röntgen; y el azar en la ciencia, 48.
- Resiliencia 547.
- Ruido; blanco, 272; de una señal, 271; ley 1/f y complejidad, ; ley del, 271; rosa, 272; subjetividad del, 271.
- S**
- Saunders P.T. 239, 240, 241.
- Schiff J.L. 262.
- Schöderbeck P.P. 441.
- Scholes 365, 368, 379, 384, 386.
- Schrödinger E. 28, 246, 247; objetividad en la ciencia. 28.
- Semántica(s); qué es, 58; veracidad de una hipótesis y la, 57; y teoría de la información. 201.
- Semiótica; qué es, 57.
- Senge P. 17, 312, 374, 395, 396, 397, 398, 402, 403, 407, 409, 412, 420.
- Sensación de inconformidad; cosmovisión y, 378; situación problemática y, 372; transformaciones y, 427.
- Sentido común 22, 306, 339.
- Shannon C. 201, 203.
- Shannon & Weaver 201, 203.
- Silogismo; composición de un, 34; deducción y, 34, 131; emergencia sistémica y, 440; inducción y, 35; nuevos conocimientos y el, 33; razonamiento y, 465; sofisma y, 465; término medio, 466; tipos de razonamiento, 466.
- Simetría; ruptura de, 288; temporal, 479.
- Simon H. 181, 183, 184, 185, 364, 439, 451.
- Simulación; de multiagentes, 220; de sistemas distribuidos, 220.
- Simultaneidad; en Einstein, 471; medición y, 459.
- Síntesis; conocimiento parcial, ; del conocimiento, 100; diseño del sistema y. 339, 343; qué es, 24; racionalismo y empirismo, 459.
- Síntoma(s); límite del crecimiento, 403; oscilación del, 408; solución del, 406, 407, 409.
- Sistemática; teoremas sistémicos, 446.
- Sistema(s); abiertos, 112, 124, 126, 127, 144, 145, 194, 309, 317, 500, 501; estabilidad, 113; y retroalimentación, 143; abierto y energía de Gibbs, 196; abierto y entropía, 195; acople de, 346; adaptable, 494; adaptable (adaptativo), 290; adaptación, 287; administración de un, 318, 323; aislados, 111, 112, 302, 500; ambiente del, 133, 319, 512; definición. 319; ambiente, restricciones, 318; ampliado,; objetivos. 342; análisis de, 331; análisis del S. político, 385; animados, 158, 160, 302, 430; aspectos internos y externos, 307; auto-organizados, 197, 198, 500, 501; auto-regulado, 146; axiología de los, 117; axiomático de Peano, 473; basados en conflictos, 375; basados en tareas primarias, 375; básicos. Clasificación de Checkland, 161; binomial, 490; blandos, 164, 312, 364, 367; capacidad de carga, 533; cerrados, 111, 126, 127, 145, 317, 485, 500; cerrados y equilibrio, 113; ciencia analítica, ciencia de los, 127; ciencia, tecnología, filosofía de los, 116; clasificación de los, 150; Ackoff, comportamiento. 155; Ackoff, organizacional. 158; Ackoff, según su comportamiento. 155; Clasificación de P. B. Checkland, 161; De la actividad humana. 162; Duros y blandos. 164; Sociales y culturales. 163; como ente real, 423; complejidad de un, ; complejidad en los, 498; complejos, 104, 126, 137, 140, 142; complejos. Características, 282; complejos, H. Simon, 181; complejos:

organizaciones, 289; comportamiento complejo, 285; comportamiento de un, 496; concepto de, 105; concepto de, críticas, 441; concepto de formalización de una T.G. de, 149; con propósito, identificación de un, 368; constructos mentales, 312, 423; control del, 350; crítica a la filosofía de, 437, 438; crítica heurística de los, 314; críticas a la teoría general de, 437; cuasidescomponibles, 181; de ecuaciones diferenciales, 495; de E.D. y las leyes de los, 173, 176; definición de, 105, 506; O. Lange, 178; definición de (Angyal), ; definición de (Bertalanffy), 173; definición del, 342; definición de (O. Lanage), 180; definición de S. ampliado, 342; definición operativa de,; de la actividad humana, 124, 164, 287, 312; medidas de actuación. 319; de la actividad humana. Definición (N), 364; de las partes y el todo, 103; de Linneo, 488; de metodologías sistémicas, 326; de referencia, 459; de referencia (N), 459; descentralización en los, 125; de sistemas, 326; determinados, 158, 430; dinámica de, 105, 311, 346; dinámicos, 241; diseñados, 162; diseño del, 343; diseño de S. sociales, 312; disipativos, 197; duros, 164, 326; ecológicos, 158, 160; elemento líder, 499; elementos externos del, 350; emergencia, 286; emergencia. Crítica, 440; emergencia y la ciencia clásica, 131; en equilibrio, 500; energía de un, 111; energía interna, 506; enfoque de, 20, 104, 117, 315, 421; en una empresa. 338; enfoque emancipador, 313; entalpía de un, 196; entropía de un, 194, 514, 518; entropía negativa en los, 196; epistemología de los, 117; equifinal, 500, 501; equifinalidad en los, 124; equilibrio de un, 196; estables.; estado de un, 496; estado estable, 501; estados esenciales, 128; estado termodinámico de un, 190; estructura del (O. Lanage), 178; estructura de un. 353; evento, reacción, respuesta, comportamiento, acto de un, 155; evolución, 287; existencia de un, 106; existencia de una T.G.S.; filosofía de los, 117; filosóficos, 314; formalización de una T.G. de.; geocéntrico, 58; grado de complejidad de un, 273; hipótesis generales de la T.G. de, 172; ideal, 314; imprecisión del concepto de S. Crítica.; ingeniería de. 363; ingenieros de, 341; intencionado, 494; intencionados, 109, 157; intencional, 494; intencionales, 145, 157; intencionales (N), 109; intervención

del, 310; jerarquía de, 372; jerárquicos descomponibles, 181; jerárquicos, Mesaroviç, 172; jerarquización de. Críticas, 439; jerarquización de los, 132; juguete Kauffman, ; la propuesta de O. Lange, 177; Las leyes de los sistemas (Lange), 180; leyes de los, ; limitaciones (Bertalanffy), ; Limitaciones. O. Lange, 180; límite de la complejidad de un, 274; lógico deductivo, ; matemáticas de los, ; matriz estructural del, 504; mecanización-descentralización, 126; medidas de actuación del, 319, 323; medidas de la complejidad de los, 223; método comparativo en los, 40; modo de acción (Lange), 179; naturales, 162; no-equilibrio de un, 197; no lineales y caos, ; objetivos del, 318, 342; ontología de los, 117; operación inicial del, 345; orden jerárquico, 499; organización del proyecto del, 340; organizados, 314; pensamiento blando de, 367; pensamiento de, 326, 367; pensamiento de S. duro y pensamiento blando, 365; pensamiento duro de, 367; principio de incompatibilidad de los, 207; que buscan metas. ; que buscan múltiples metas, 156, 493; que buscan una meta, 493; que contiene al problema, 382; que mantienen un estado, 156, 493; que resuelve el problema, 382; rango de complejidad de los, 326; rango de los objetivos de un, 326; reactivos, 156; real, 369; recolección de datos del, 343; reconstructabilidad de los (G. Klir), 183; recursos del, 318, 320; regulador de un, 129; relevante(s), 378; responsivos, 156, 158; retroalimentado, 143; retroalimentados, 145, 350; reversibilidad en los, 92; segregación, mecanización del, 497; SGSR, 110; simples, 104; simulación de, 332; social, 289, 290, 302, 425; social, análisis del, 384; sociales, 160; Complejidad. 284; sociales y culturales, 163; subsistemas, 132, 321, 338, 375; metas de los subsistemas. 324; partes de un S. 321; tamaño de un, 139; tareas primarias, 374; técnicos, 367; tecnología de los, 116; teleológicos, 103; tendencia a la centralización, 499; Teoría General de, 20, 103, 104; ¿qué es? ; Teoría General de Sistemas, críticas, 444; tipos de S. Ackoff, 493; total, 323; trabajo de un, 191, 511; trascendentales, 153, 162; variables esenciales, 129; variedad en el, variedad del ambiente, 127; viable, S. Beer, 311; visión de Luhmann, 309; visión funcionalista, 310; vi-

- vientes y complejidad, ; vivos, 311, 326; vivos y no-equilibrio, 197; y la ciencia de los sistemas, 326; y la T.G.S. ; y los "sistemas" extremos, 133; y teoría cuántica, 250.
- Sistemicidad 367.
- Sistemicidad (N) .
- Skyttner, L. 72, 97, 100, 184, 214, 249, 250.
- Smith, L. 225, 226, 233, 527, 557.
- Sociología; ciencia de los sistemas y la, 105; Comte y la, 39; constructivista, 147; dinámica de sistemas y, 350; división según Comte, 39; elemento básico en la, 88; experimentación y, 39; fracasos del enfoque clásico de la ciencia, ; investigación en, 305; la T.G.S. y la, 284, 309, 445; líderes y, 126; Luhmann y la, 309; métodos en la, 89; reduccionismo y, 91; teoría de catástrofes y, 243; teoría de la complejidad y, 117, 136, 309; teoría del estructuralismo en, 32.
- Sofisma; qué es, 465; razonamiento incorrecto, 465.
- Sokal A. 78; críticas a Popper, 79.
- Sokolnikoff & Redheffer 482.
- Stewart I. 231.
- Stokes, J.L. 558.
- Strogatz S. 280, 282.
- Subjetivo; conocimiento, 23, 27; qué significa, 25; ruido, concepto, 271; sociología y lo, 309.
- Subsistemas; acople de, 338; administración del sistema y los, 323; como proceso de transformación, 338; cuasidescomponibilidad y, 182; definición del sistema y, 342; determinados, animados, sociales, 159; el "cómo" de la MSB, 379; emergencia sistémica y, 137, 283; jerarquía y, 307; líder de los, 499; medidas de actuación, 317, 318, 319; modelo(s) conceptual(es) y, 378; ¿por qué definirlos? 322; razón de ser, 321; ver Sistemas, 135.
- Sussman M.V. 201.
- Swinborne, R. 558.
- T**
- Taber & Timpone 68.
- Tareas primarias; sistemas relevantes y, 374.
- Taxonomía; qué es, 488; sistema de Linneo, 488.
- Técnica; de aislamiento, 102; metodología, método y, 299; visión orientada por la, 302.
- Teleología 124, 131, 152, 157.
- Teleonomía 124, 131, 157, 222.
- Temperatura; gradiente de, 509; ley de Fourier, 508; propiedad extensiva, 511; y calor, 189, 510; y células de Bénard, ; y eficiencia térmica, 192; y el ciclo de Carnot, 512; y energía cinética translacional (n), 512; y energía interna, 515; y entropía, 127, 193, 194, 514; y equilibrio térmico, 189; y estado termodinámico del sistema, 189; y homeostasis, 143; y la ley de la conducción del calor, 190; y la máquina de Carnot, 191; y la tercera ley de la termodinámica, 193; y máquina térmica, 190; y movimiento de traslación molecular, 189; y movimiento molecular, 90; y presión, 347; y procesos espontáneos, 196; y propiedad de orden, 422; y recipientes calóricos, 194; y sistema cerrado, 111; y termostato, 128, 143, 144, 400, 487; y termostato electrónico, 488.
- Teoría; científica, 48, 55, 61, 76, 78, 82, 116, 121, 444; Qué es, 32; creatividad y, 46; cuántica, 199; datos y, ; de catástrofes, 238, 270; de conjuntos difusos, 206, 521; definiciones en una, 57; de fractales, 234, 273; de Gall, 446; de la complejidad, 217, 218, 221, 222, 289, 290, 292, 306, 310, 445; de la evolución, 94; de la herencia, 62, 63; de la información, 116, 201; de la pangénesis (n), 62; de la percepción, 134; de la relatividad, 469; de la selección natural, 94; de las relaciones (Hegel), 438; del caos, 224, 284, 445; del castigo (Lombroso), 68; del crecimiento, 151; del pensamiento, 465; de matrices, 60; de redes, 302; errores y, 81; especial de la relatividad, 471; estructuras disipativas, 197; experimento y, 37; Fayol y Taylor, 316; formal, 52, 54, 55, 106, 134, 149, 166, 171; formal (Bertalanffy), 176; formal (Lange), 180; general de sistemas, 103, 107, 112, 116, 117, 136, 149, 187, 217, 218, 284, 437, 444, 497; Qué es. 21, 104; general de sistemas, formalización, 149; general de sistemas, isomorfismos, 116; geocéntrica, 58, 95; heliocéntrica, 33, 58; Maltus, 67; multitud-antimultitud, 258; Qué es ; significado de una, 150; solidez de una, 166; veracidad de una, 59, 62, 63, 64, 71, 77, 78, 79, 82.
- Teoría de grafos; bases, 265.

Teoría General de Sistemas; ámbito de la, 165; posibilidad de una, 166.

Teorías; administrativas, 115, 317; anomalías, 47, 78, 80; contraejemplos, 58, 59; deducción y, 33, 36; económicas, 68; hipótesis y, 56; inducción y, 33, 76; intuición, suerte... en las, 47; ley y, 122, 123; matemáticas, 52, 53, 60, 117, 170, 206; metodologías y, 302, 306, 311; método y, 81; observación y, 76; paradigma, 79; reemplazo de, 80; sociales, 309.

Término medio; silogismo y, 466.

Termodinámica; irreversible, ; lazo cerrado y, 144; medición de la complejidad y, 223; primera ley, 506, 515; qué es, 188; segunda ley, 113, 196, 197, 199, 274, 519; segunda ley (n), 197; teoría cuántica y, 199; tercera ley, 193.

Termostato; elemento regulador, 129; equifinalidad y, 145; lazo de retroalimentación y, 143, 400; qué es, 487; qué es (n), 129; sistema animado y, 160; sistema que mantiene un estado, ; tercer nivel de Boulding y, 151.

Terremotos; frecuencia de, ; invarianza en la escala, 270; ley 1/f y, ; ley exponencial, 272; magnitud y probabilidad de los, 270.

Thom, R.; ciencia moderna y, 239; morfogénesis, 242; siete catástrofes, ; teoría de catástrofes, 238; topología diferencial, 239.

Tiempo; adaptación, coevolución y, 288; caída de los graves, 30, 37, 57; causalidad y, 157, 471; ciclos constantes de, 278; continuo, 495; definición de, 57, 107; de reacción, 179; discreto, 276; en Kant, 22; espacio en Einstein, 471; estado independiente del, 126, 173, 194; estándar (n), 425; evolución y, 273; para disminución de la entropía, 206; propiedad medible, 167; reversibilidad del, 92, 93, 94, 479; series de T. divergentes, 527; simultaneidad y, 459.

Todo; biológico, 497; contenedor, contenido, 308; el universo como un, 97; integrado, 95, 107, 250; intencionado, 158; las partes y el, 21, 24, 103, 134, 158, 217, 222, 301, 321, 324, 337, 392, 438, 440, 443; lógica del, 213; más que la suma de las partes, 130, 440; o nada, ley del, 122; propósitos en el, 160; sistemas determinados y el, 159; supervivencia del, 125; visión como un, 117,

134, 160, 219, 318, 322, 325, 337, 338, 377, 396, 439, 441, 497, 498.

Torricelli; cálculos matemáticos, 464; concepto de ciencia en, 48; experimento de, 463; explicación del fenómeno, 463; postulado sobre la presión, 461; presión atmosférica y, 32, 47; teoría de T. y teoría de Linus, 465; una teoría formalizada, 465.

Trabajo; administrativo (Gall), 449; cálculo del T. de un sistema, 191; calor y, 190, 191, 507, 511; calor y (n), 112; capacidad de producir, 113, 125, 126, 191, 193, 194, 506, 515; capacidad de producir (n), 94; definición de, 511; diferenciación del, 152; división del, 39; división tradicional del, ; efectivo de un grupo, 287; en equipo, 396; energía libre y, 196; energía y, 189, 507; entropía y, 193, 518; estados estables y, 113; irreversibilidad y, 516; manual, 67; medición del, 513.

Tragedia; del terreno común, 416.

Transdisciplina; en Comte, 305; en Jackson (n), 305.

Transformación; características de una, 377; cosmovisión y, 378; de energía, 506; definición raíz y, 378, 379; elementos de una, 376; entrada-salida, 178, 502; matriz de, 180, 503; propósito y, 375; sistema relevante y, 377; T, ecuación, 502; teoría de catástrofes y, ; visión enriquecida y, 381.

Transición; de estado, 278; de fases del agua, 242; de fases (Kauffman), 274.

Trayectoria; al interior del átomo, 468; caos y T. en Poincaré, 527; de control, 241; del planeta Mercurio, 58; dependencia de la T. en economía, 284; ecuaciones diferenciales y, 173; en el espacio de fase, 496; en la mecánica clásica, 206; entropía y, 514; equifinalidad y, 124; islas de orden y, 283; resiliencia y, ; reversible, 514; teoría de catástrofes y, 241; termodinámica, 196.

Tres cuerpos; problema de los, 227, 229.

Trivium; en la Edad Media, .

Troitzsch, K.G. 68, 219.

U

Universidad; como organización, 374; conflicto entre objetivos, 323; cosmovisiones y, 378; diferentes conceptualizaciones, 376; inicio de

la, ; investigación en la, 390; medición de la investigación, 319, 322; roles en la, 385.

V

Validez; de la inducción, 76; de la inferencias, 60; de la relación precisión-predicción, ; de las hipótesis, 60; del principio de reversibilidad, 92; de postulados (hipótesis), 123; de una predicción. ; de una premisa, 36; de una teoría, 122.

Valor(es); axiología, 117; bolsa de, 284; cambio de V. en simulación, 358; crítico (células de Bénard), ; de la capacidad de carga, ; del intervalo Dt, 356; en las metodologías emancipadoras, 313; en las metodologías interpretativas, 311; escala de, 118; grado de pertenencia, 208, 210; humanos, administración humanista, 316; lingüístico, 524; máximo (entropía), 203, 206, 516; mercado de, ; mundo de los, 117; normas, roles, 365, 373, 385; posicional en el sistema, 214; renormalizado, 533; sistema de, 152; visión compartida y, 396.

Variable(s); auxiliares, 351, 352; binarias, 220; compleja, 236; complejidad estática y, 138; complejidad y, 139; costos, 431; dependientes, independientes, 150; difusas, 212, 522; ecuaciones y, 150; esenciales de un sistema, 129; exógenas, 350, 355; fundamentales y resolución en Galileo, 85; independientes (Galileo), 86; lineales, 332; lingüísticas, 524; máximo número (Miller), 183; medición de, 422; método comparativo y, 40; número inmenso de V. y Laplace, 93; observación de, 46; reductibilidad y, 140; seres humanos V. y la sociología, 89.

Variedad; cuasidescomponibilidad y, 184; definición de la, 127; de interpretaciones y complejidad, 126; entre híbridos, 64; flujo de, 129; obligada, 127, 129; reducción de la, 128, 130, 142; regulación y, 128.

Vaucanson; pato de, 92, 103.

Vida; Aristóteles y la, 102; artificial, 147, 158; complejidad de la, 237; evolución de la, 94; hecho inevitable, 275; juego de la, 292; lapso de V. y tamaño, ; materia inanimada y, 274; no equilibrio y, 159, 197; origen de la, 275; rango de, ; real, casos de la, 435; real y metodologías, 302; reductibilidad y, 140; transiciones de fase y, 275.

Visión; antropomórfica, ; aristotélica, 91; cibernética de los sistemas, 181; compartida, 287; de la complejidad, ; del mundo, 46, 93, 199; de mundo, cambio, 79; enriquecida, 381, 389; global, 96, 104, 117, 305; holística, 103; lineal, 422; macroscópica de la entropía, 204; moderna de la auto-organización, 288; moderna de la genética, ; moderna de la organización, 289; newtoniana, 190; no lineal, 102; orientada por el problema, 302; orientada por la técnica, 302; reduccionista, mecanicista, 95.

Vital; fuerza (elán), .

Von Foerster H. 309.

W

Warfield J.N. 312, 327, 367.

Watson; y el ADN, 47.

Watt; regulador de, 145.

Watts D. 265, 280, 282.

Watts & Strogatz 542.

Weaver; cantidad de información, 203; teoría de la información, 201.

Weltanschauung; definición raíz y, 377; dueño del problema y, 383; etimología (n). 372; minimización de la, 372.

Whewell; teorías científicas y leyes, 61; término "científico" y, 70.

Wiener; sistemas cibernéticos, 103; teleología, 103.

Woodcock & Davis 241, 244.

Wooldrige M. 220.

Wulff, H.R., Pedersen, S.A. & Rosenberg R 457.

Z

Zadeh L.A. 206, 522; complemento, 524; complemento de un conjunto difuso, 212; concepto de juventud, 208; conjuntos difusos, 206; lenguajes difusos, 524; unión, intersección difusa, 523.

Zeeman; máquina de, 239, 241.

*Este libro terminó de diagramarse en febrero del 2017, en Recursos
Informáticos y Educativos CRIE, bajo el cuidado del autor.
Pereira, Risaralda, Colombia.*

La Editorial de la Universidad
Tecnológica de Pereira tiene como política
la divulgación del saber científico, técnico
y humanístico para fomentar la cultura
escrita a través de libros y revistas
científicas especializadas.

Las colecciones de este proyecto son:
Trabajos de Investigación, Ensayos, Textos
Académicos y Tesis Laureadas.

Este libro pertenece a la Colección
Textos Académicos.

Hasta la mitad del siglo XX, lo que conocemos como ciencia clásica se ocupaba de fenómenos de cierta dificultad gracias a su poderosa metodología, y a los métodos y técnicas que se fueron desglosando de ella a lo largo de sus quinientos años de desarrollo. Sus características fundamentales eran el aislamiento del fenómeno, la consideración de las partes como elemento fundamental de la comprensión del todo, y la causalidad lineal, cadena de secuencias que permitía estructurar las dificultades de manera relativamente sencilla y posibilitaba establecer leyes que regían los fenómenos estudiados.

Hacia mediados del siglo pasado, y en vista de la dificultad de enfrentar con estos conocimientos clásicos fenómenos complejos tales como la violencia, la falta de educación de los pueblos, los cambios del clima en el planeta y las guerras, entre muchos otros, los hombres de ciencia retomaron de alguna manera el holismo griego y, en términos modernos, plantearon una manera diferente de enfrentar la complejidad.

Este texto trata de hacer un recuento, desde sus orígenes, de estos logros intelectuales presentando el estado actual de lo que se conoce como “Teoría General de Sistemas” por un lado, y “Teoría de la Complejidad” por otro. El objetivo es motivar a quienes lo estudien, a profundizar más en estos campos que prometen, de una manera diferente y complementaria a la ciencia clásica, ayudar a resolver la complejidad que se hace presente en estas problemáticas actuales.

ISBN: 978-958-722-228-9