

MONÓXIDO DE CARBONO EN SISTEMAS A GAS NATURAL

JOHN FREDY GÓMEZ OSORIO  
JORGE LUIS GAVIRIA VARGAS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
ESCUELA DE TECNOLOGÍA ELECTRICA  
PEREIRA  
2007

CONTROL DE LOS NIVELES DE MONÓXIDO DE CARBONO EN SISTEMAS A  
GAS NATURAL

JOHN FREDY GÓMEZ OSORIO  
JORGE LUIS GAVIRIA VARGAS

TRABAJO DE GRADO

Director  
Ing. Msc SIGILFREDO ARREGOCES

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
ESCUELA DE TECNOLOGÍA ELECTRICA  
PEREIRA  
2007

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira día de mes de 2007

## AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Sigilfredo Arregoces, director y gran colaborador en todos detalles de este gran proyecto.

Al ingeniero Juan Ramírez De verguer gracias a él se lograron construir las piezas primordiales del servomecanismo.

Al ingeniero Oscar Gómez por orientarnos en la parte escrita del trabajo, las normas, el orden, el contenido, etc.

Al profesor Walter Cano por su incondicional disposición a resolver nuestras dudas acerca de control.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	
1. LAS VARIABLES DEL PROCESO	1
2. EL RESULTADO ESPERADO	2
3. EL SISTEMA A GAS NATURAL	5
4. EL PROTOTIPO	7
4.1. EL SERVOMECANISMO	7
5. OPCIONES PARA CORREGIR EL ERROR	13
6. EL SENSOR	21

7. EL CONTROL	27
7.1. IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA LLAMA CON EL MOTOR OPERANDO A VALORES NOMINALES	27
7.2. ESQUEMA DE CONTROL	34
8. ALGORITMO	36
8.1. LA PROGRAMACIÓN	37
9. CONCLUSIONES	41
10. RECOMENDACIONES	43
11. BIBLIOGRAFÍA	44

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. ANÁLISIS VOLUMETRICO	2
Tabla 2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	22

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. COMBUSTIÓN COMPLETA E INCOMPLETA	4
Figura 2. MECHERO DE BUNSEN	5
Figura 3. VIROLA	6
Figura 4. VIROLA MODIFICADA	8
Figura 5. CORREA AJUSTADA A LA VIROLA	8
Figura 6. SERVOMECANISMO	9
Figura 7. CUERPO DEL MECHERO CON LA NUEVA VIROLA	10
Figura 8. MOTOR DC DE 24V CON PIÑÓN ADAPTADO AL EJE	11
Figura 9. PROTOTIPO	12
Figura 10. DIVISIÓN ANGULAR DE LA VIROLA	14
Figura 11. DISCO DE BANDAS METALICAS PARA SENSOR INDUCTIVO	18



Figura 12. DINÁMICA DEL SERVOMECANISMO VISTA EN UN OSCILOSCOPIO PORTATIL	20
Figura 13. SENSOR DE RADIACIÓN	24
Figura 14. DISTANCIA DEL SENSOR A LOS OBJETOS	25
Figura 15. DINÁMICA DEL SISTEMA A LAZO ABIERTO	28
Figura 16. DIAGRAMA DE BODE	30
Figura 17. MARGEN DE FASE Y MARGEN DE GANANCIA	31
Figura 18. DINÁMICA DEL SISTEMA A LAZO CERRADO CON CONTROL	34
Figura 19. ESQUEMA DE CONTROL	35
Figura 20. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO	38

## RESUMEN

El objetivo central de este proyecto es controlar los niveles de monóxido de carbono en sistemas a gas natural, ya que las emisiones de monóxido de carbono (CO) son altamente perjudiciales para la salud humana y para el medio ambiente, el fin de controlar estos niveles es minimizarlos en lo posible.

Para el proyecto se escogió como sistema a gas natural un mechero bunsen el cual fue modificado para realizarle un control automático adecuado.

Uno de los elementos mas importantes de todo el trabajo es un sensor de radiación que indirectamente me indica cuando hay emisión de monóxido de carbono fuera de lo normal.

Se programó un autómata para que todo el tiempo este vigilando el mechero, y en caso de que el sistema a gas empiece a contaminar emitiendo monóxido de carbono, el autómata reaccione rápidamente corrigiendo el mal desempeño del mechero bunsen, tratando en lo posible que el sistema a gas siempre realice una combustión óptima sin emisiones de monóxido de carbono.

Se usó un equipo SIMATIC (el autómata) de la tecnología siemens el cual se cableó con las entradas y salidas necesarias y se le indicó el algoritmo a seguir (la programación) para el buen desempeño automático de constante vigilancia y rápida acción.

## GLOSARIO

**ALGORITMO:** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

**AUTÓMATA:** Un autómata motoriza las entradas, toma decisiones tomadas en su programa, controla las salidas para automatizar un proceso o máquina. Este curso trata de suministrar la información básica sobre las funciones y las configuraciones del autómata programable.

**BUNSEN:** Esencialmente constan de un tubo, llamado cañón, a cuya base llega la entrada de gas a través de un pequeño orificio (chiclé). En esta zona existen unas aberturas, regulables mediante una anilla (virola), que permiten la entrada del aire al cañón. La expansión del gas a través del pequeño orificio succiona el aire exterior produciéndose, de este modo, una mezcla gas-oxígeno que asciende por el cañón hasta la boca del mismo que es donde se produce la llama.

**COMBURENTE:** Que provoca o favorece la combustión.

**COMBUSTIBLE:** adj. Que puede arder. || **1.** Que arde con facilidad. || **2.** m. Leña, carbón, petróleo, etc., que se usa en las cocinas, chimeneas, hornos, fraguas y máquinas cuyo agente es el fuego.

**CONTROL:** Regulación, manual o automática, sobre un sistema.

**CORRIENTES DE FOUCAULT:** Corrientes inducidas en las masas conductoras, sometidas a una variación de flujo magnético. Estas corrientes generadas por la inducción o corrientes de Foucault, son nocivas en todas las máquinas, ya que representan una inútil disipación de energía en forma de calor por el efecto de Joule.

**ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO:** Se denomina espectro electromagnético al conjunto de ondas electromagnéticas o, más concretamente, a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda o la frecuencia de la radiación.

**PROTOTIPO:** Ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

**RADIACIÓN:** Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.

**SENSOR:** Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

**SENSOR INDUCTIVO:** Un sensor inductivo se excita cuando se encuentra a cierta distancia de una superficie metálica.

**SERVOMECANISMO:** Sistema electromecánico que se regula por sí mismo al detectar el error o la diferencia entre su propia actuación real y la deseada.

**TRANSDUCTOR:** Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

**TRANSMISOR:** Aparato telegráfico o telefónico que sirve para producir las corrientes, o las ondas hercianas, que han de actuar en el receptor.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo demuestra una vez más que un sistema de control puede cumplir eficientemente una labor importante, pero de mucho tedio para que la cumpla un ser humano y además con valores agregados como la precisión y constante vigilancia. El aporte consiste en minimizar los altos y nocivos niveles de monóxido de carbono presentes en cualquier sistema a gas cuando produce combustión incompleta.

Para que la combustión producida siempre sea completa se debe cumplir con una relación entre el combustible (en este caso gas) y el aire presentes en el proceso, es decir que se evidencian dos variables que se pueden manipular para lograr el objetivo.

Para saber cuando hay combustión completa se puede acudir a varios métodos, un método es utilizar las relaciones entre combustible y comburente que hay en tablas de anteriores investigaciones, pero como el control se debe hacer lo más fácil posible, se utilizó otro conocimiento previo; las propiedades físicas de la llama, la cual nos indica que cuando se produce combustión completa con gas la llama provocada es de color azul esto nos facilita la tarea ya que sin necesidad de mantener una proporcionalidad conocida entre los dos factores en mención (gas y aire), si se sabe cuando hay la combustión óptima.

El anterior develamiento lleva a buscar un sensor que identifique este parámetro (el color azul), la tarea es concluyente cuando se empezó a hacer ensayos con un sensor de radiación y un transductor que toma lo registrado por el sensor y entrega una señal eléctrica. Como los cuerpos irradian diferente a medida que su temperatura cambia y además un sistema a gas cuando produce combustión completa la llama que genera tiene mayor poder calorífico que cuando es

incompleta. Y efectivamente estos ensayos mostraron que el sensor entregaba un valor que difería cada vez que se censaba la llama que era totalmente azul con respecto a la llama amarilla.

Teniendo todos estos conocimientos solo faltaba encontrar o diseñar un sistema a gas y acudimos a uno que se encontró durante la investigación inicial muy utilizado por estudiantes de química; el mechero bunsen ideal para la demostración de nuestros objetivos, el mechero se modificó para hacerle el control automático entregando resultados espléndidos.

## 1. LAS VARIABLES DEL PROCESO

La combustión es un cambio químico en el que un “combustible” (carbón, gas natural, madera o algún derivado del petróleo) se combina con oxígeno para producir otras sustancias, denominadas “productos de la combustión” y además este proceso libera luz y energía en forma de calor, esta definición de entrada nos indica cuáles son las variables del proceso, que para este caso son el gas natural y el aire.

Cada vez que se hace combustión con gas natural y oxígeno hay dos posibilidades: que sea completa o incompleta, si es completa se produce  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  (gas metano) o  $4\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  (gas etano) y la llama que se obtiene es la mejor que aquella mezcla (combustible y comburente) puede brindar además es de color azul, pero si es incompleta se produce  $\text{CO} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  (gas metano) o  $\text{CO} + 4\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  (gas etano) y la llama que brinda no tiene el máximo provecho que se puede obtener además la llama es de color rojizo. En otros términos esto es mayor o menor poder calorífico.



## 2. EL RESULTADO ESPERADO

Se quiere minimizar los niveles de monóxido de carbono presentes en cualquier combustión real, esto se logra haciendo que la reacción entre el gas natural y el aire tenga cierta proporcionalidad de manera que sea la correcta para una combustión completa.

Existen tablas que se pueden utilizar en el proceso de optimización de la combustión completa como se presenta en la tabla 1.

**Tabla 1. ANÁLISIS VOLUMÉTRICO**

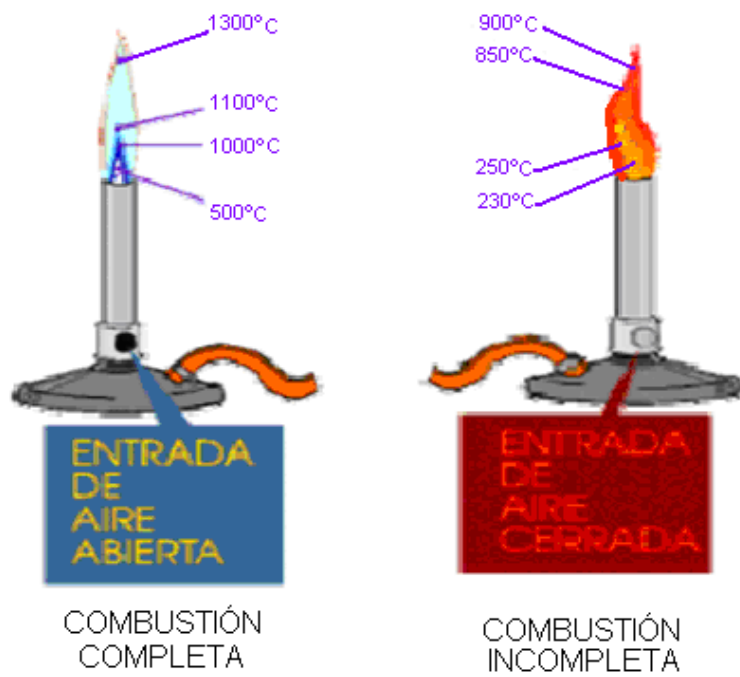
	A 17°C	A 0°C	PESO MOL	ANÁLISIS DE PESO
CO <sub>2</sub>	0.004m <sup>3</sup>	0.0038m <sup>3</sup>	44	0.0075Kg
CH <sub>4</sub>	0.921m <sup>3</sup>	0.867m <sup>3</sup>	16	0.6193Kg
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.041m <sup>3</sup>	0.0386m <sup>3</sup>	30	0.0517Kg
N <sub>2</sub>	0.034m <sup>3</sup>	0.032m <sup>3</sup>	28	0.04Kg
TOTAL	1.000m <sup>3</sup>	0.9414m <sup>3</sup>		0.7185Kg
	PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN	PESO DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN		VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

315°C

CO2	0.0075CO2		
CH4	1.7031CO2	1.8623	2.128
C2H6	1.3934		
N2	0.1517CO2	1.4864	4.153
H2O	0.093	8.8792	15.052
N2	8.8792		

Pero existe una forma muy efectiva de encontrar la mezcla perfecta entre el gas y el aire para lograr de una combustión completa. La propiedad física más sobresaliente de la llama cuando hay combustión completa es que la llama es de color azul, sin saber que proporción aporta el gas con respecto al aire existe la certeza que la combustión emite bajos niveles de monóxido de carbono además la llama tiene un alto poder calorífico ver las graficas de un mechero bunsen en combustión completa e incompleta de la figura 1.

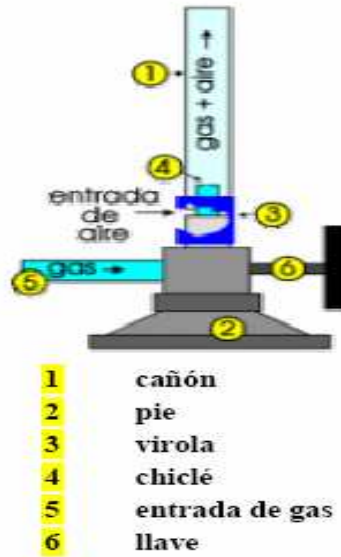
**Figura 1. COMBUSTIÓN COMPLETA E INCOMPLETA**



### **3. EL SISTEMA A GAS NATURAL**

En el anterior capítulo se observa un mechero que muestra dos tipos de llama la azul y la amarilla que indican combustión completa o incompleta respectivamente. Este mechero es conocido como el mechero de bunsen muy usado en procesos químicos ver figura 2.

#### **FIGURA 2. MECHERO DE BUNSEN**



Este dispositivo tiene una llave para la entrada de gas y una virola giratoria que regula la entrada de aire, esta última se hace girar manualmente hasta ver el cambio deseado en el color de la llama ver figura 3, dejando la entrada de gas constante con la abertura e la llave.

**FIGURA 3. VIROLA**



## 4. EL PROTOTIPO

### 4.1. EL SERVOMECANISMO

Un servomecanismo es un sistema compuesto, formado de partes tanto mecánicas como electrónicas que en ocasiones son usadas en [robots](#), con parte móvil o fija. Puede estar formado también de partes neumáticas, hidráulicas y controladas con precisión.

Ejemplos: brazo robot, mecanismo de frenos automotriz, etc.

El servomecanismo es un sistema electromecánico que se regula por sí mismo al detectar el error o la diferencia entre su propia actuación real y la deseada; para este caso el servomecanismo se compone de tres fases enlazadas por dos correas de caucho como se muestra en la figura 6:

1. motor de corriente continua de 24 V con piñón adaptado al eje
2. reductor de velocidad con piñones adaptados a cada eje
3. anillo del mechero o virola modificada ajustada a la necesidad que exige el servomecanismo

El motor de corriente continua esta acoplado al eje primario del reductor de velocidad por medio de una correa de caucho y el eje secundario del reductor esta acoplado por medio de otra correa abraza la virola modificada justo para que encaje la correa. El fin de este sistema es el poder mover en ambos sentidos de giro la virola que abraza fuertemente el cañón del mechero pero a velocidad baja, porque como se esta tratando con una llamarada la cual es inestable y movediza se debe tener en la cuenta que el sensor es rápido y los repentinos cambios en la

entrada del aire a través de la virola dispararía continuamente el sistema correctivo sin ver un resultado de control eficiente.

Como la idea es que el cambio en la llama se haga automático entonces se diseña un mecanismo adaptado a la entrada de aire giratoria que la mueva (la virola). Este mecanismo consta de un motor y una correa teniendo que cambiar la virola por una nueva que se ajuste a la correa ver figura 4 y figura 5.

**FIGURA 4. VIROLA MODIFICADA**



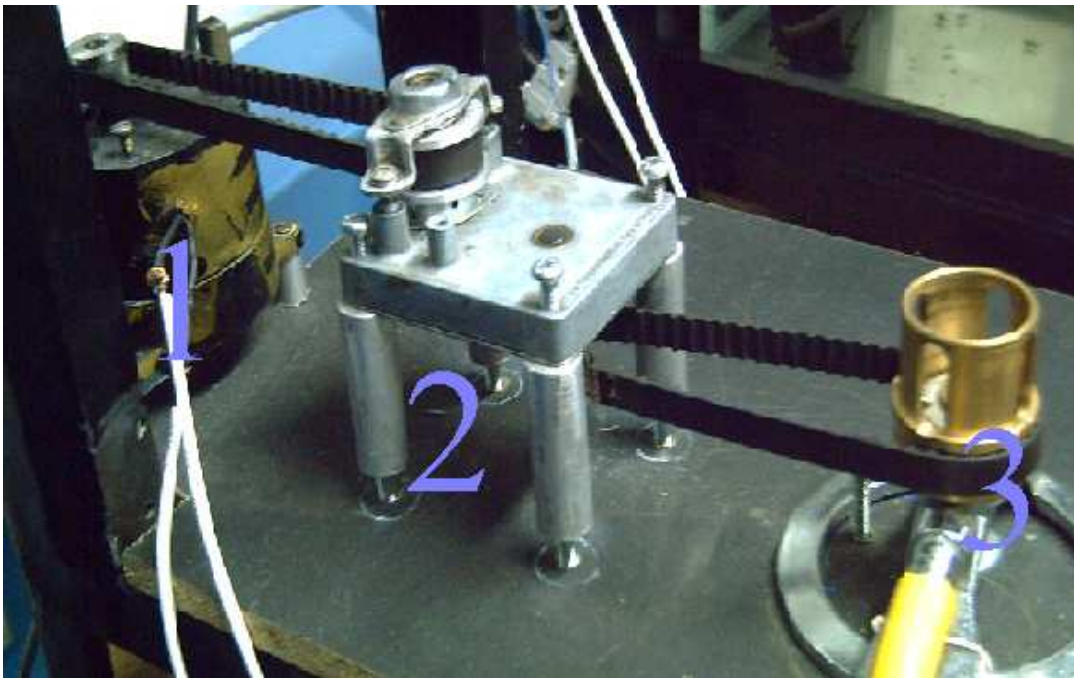
**FIGURA 5. CORREA AJUSTADA A LA VIROLA**





El motor que va a hacer girar la virola modificada a través de la correa es uno de corriente continua ya que esta característica (corriente continua) asegura un control más sencillo porque este motor nos permite girar en ambos sentidos cambiando la polaridad y su velocidad se puede controlar con el voltaje de armadura.

**FIGURA 6. SERVOMECANISMO**



**FIGURA 7. CUERPO DEL MECHERO CON LA NUEVA VIROLA**



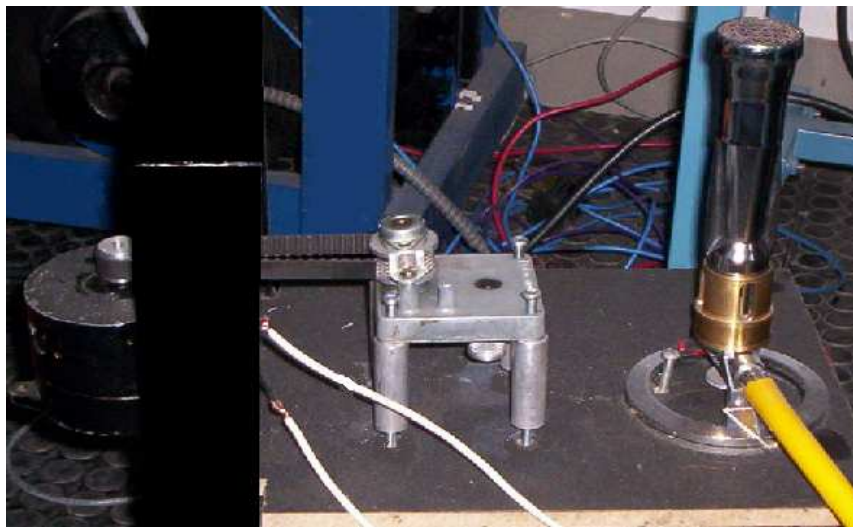
El motor es de 24V CD y se le adaptó al eje un elemento para que la correa se desplace. Ver figura 8.

**FIGURA 8. MOTOR DC DE 24V CON PIÑÓN ADAPTADO AL EJE**



Como se necesitaba mover la virola la cual estaba abrazando totalmente el cañón del mechero pero a una velocidad baja, no se podía reducir el voltaje de alimentación del motor porque se perdía fuerza, entonces se le adaptó un reductor que facilitaba enormemente la tarea ver la figura 9.

**FIGURA 9. PROTOTIPO**



Dependiendo del sensor y su ubicación el prototipo sufriría algunas modificaciones que mas adelante se mostrarán.

## **5. OPCIONES PARA CORREGIR EL ERROR**

El error es el que se da cuando el sensor o los sensores no están entregando señales que satisfagan los valores esperados que se le indican al autómata.

Como se expuso en el anterior capítulo el motor es de corriente continua por razones prácticas de control, este es el encargado de abrir y cerrar la entrada de aire.

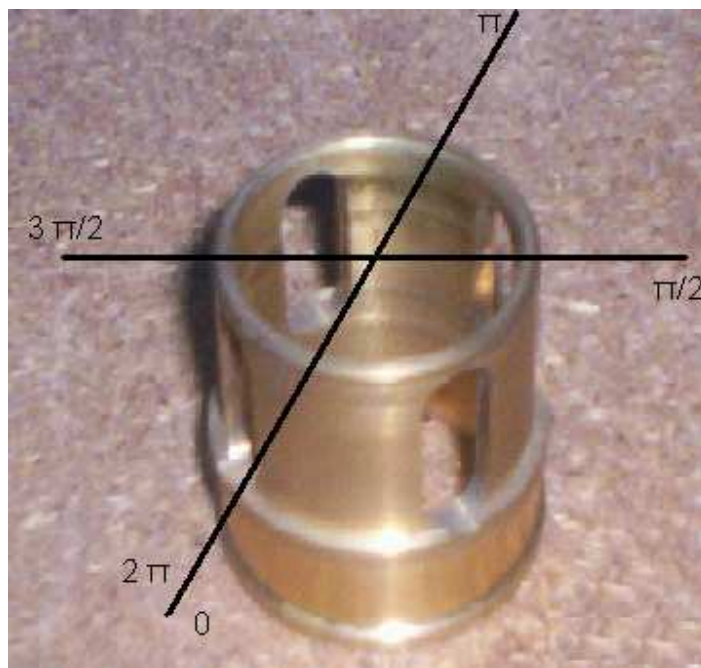
Para realizar este tipo de control se puede tomar los datos de la tabla 1 (ANÁLISIS VOLUMÉTRICO) y hacer un programa que vigile un mecanismo adecuado el cual habría que encontrarlo para que este cumpla con entregar a la combustión la cantidad de aire y gas convenientes para obtener una respuesta satisfactoria del proceso, en este caso bajas emisiones de monóxido de carbono.

Otra buena idea para que actúe de la mejor manera el prototipo es adaptarle al motor o a la virola un elemento que me indique posición angular y tener en cuenta la posición, en la que se contamine menos.

Consiste en realizar ensayos con la presión del gas constante e identificar cual es la posición angular ideal de la virola para sistematizarla dentro del programa es decir que la máquina vele por que esta posición sea fija ver figura 10.

Esta idea puede ser aterrizada de dos maneras muy prácticas para el propósito de vigilar la posición más no de controlar efectivamente las emisiones de monóxido, mas adelante se explicará porque.

**FIGURA 10. DIVISIÓN ANGULAR DE LA VIROLA**



El motor a usar posee unas características que evidencian un comportamiento, es decir que obedece a una dinámica.

## PRINCIPIOS DE LA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Para tener el modelo del motor completamente determinado se requiere, obtener todos los parámetros físicos que se encuentran involucrados en el modelo. Estos parámetros en las máquinas reales dependen de las características del bobinado del rotor, de las conexiones a los segmentos del colector, del tipo de bobinado del motor, el número de ramas en paralelo del bobinado.

El voltaje de salida del inducido de una máquina real es:

$$E_a = K' \cdot \varphi \cdot \eta \qquad K' = \frac{Z \cdot P}{60 \cdot a}$$

Donde  $K'$  Es una constante que depende de las características constructivas de la máquina.

$Z$  Es el número de conductores en el rotor.

$a$  Es el número de trayectos de corriente en el motor.

$\varphi$  Es el flujo frente al polo.

$\eta$  Es la velocidad en revoluciones por minuto.

A partir de las ecuaciones de diseño de motor se proponen pruebas de laboratorio para determinar los parámetros difíciles de obtener



en forma real del rotor del motor, tal es el caso del parámetro  $Z$ , el cual es el número de bobinas por el número de espiras de cada bobina. De forma similar, en el motor real no es fácil determinar el flujo inductor  $\varphi$ .

El momento de torsión en una máquina de corriente continua depende de tres factores:

- a. El flujo de la máquina.
- b. La corriente del inducido  $I_a$  en la máquina.
- c. Una constante que depende de la construcción de la máquina definida por:

$$T_{ind} = (Z \cdot p / 2 \cdot \pi \cdot a) \cdot \varphi \cdot I_a$$

$$K' = Z \cdot p / 2 \cdot \pi \cdot a$$

$$T_{ind} = K' \cdot \varphi \cdot I_a$$

#### VENTAJAS DEL MOTOR DC

La ecuación fundamental del motor es:

$$E_a = V_a - I_a \cdot R$$

$$\eta = K' (V_a - I_a \cdot R_a) / \varphi$$

De la ecuación anterior tenemos tres posibles formas de variar la velocidad del motor:

- a. Variando el voltaje aplicado. Alimentar el bobinado de campo del motor con voltaje fijo mientras se varía el voltaje aplicado a la armadura. En este caso, la variación de la velocidad es directamente proporcional a la variación del voltaje de alimentación a la armadura del motor.
- b. Variando el flujo de campo. Alimentar el bobinado de armadura del motor con voltaje fijo mientras se varía el voltaje aplicado en el bobinado del campo. En este caso, la variación de la velocidad es inversamente proporcional a la variación del voltaje de alimentación al bobinado de campo del motor.
- c. Aplicando variación de voltaje simultaneo a los dos bobinados del motor, se obtiene variación de velocidad.

De acuerdo a las tres posibilidades de variar la velocidad del motor de corriente continua, hemos seleccionados el primer caso (caso a) porque además de que la relación entre la velocidad y el voltaje aplicado al motor es directamente proporcional, es el método mas seguro para hacerlo. Los dos casos siguientes son inseguros a que cabe la posibilidad de que el voltaje aplicado al bobinado de campo llegue a cero y en este caso, el motor alcanza velocidades tan altas que puede destruirse.

Atendiendo al sistema de variación de velocidad seleccionada anteriormente necesaria entonces, obtener un modelo que relacione las dos variables, voltaje aplicado a la armadura como variable de entrada y velocidad como variable de salida.<sup>1</sup>

Esta idea fue analizada y se obtuvieron conclusiones muy determinantes como para desistir de ella, la conclusión mas destacada es que si el gas proviene por ejemplo de una pipeta entonces la presión del combustible va a cambiar a medida que se consume, por lo tanto esa posición prefijada de la virola ocasionaría resultados inesperados. Este método resulta efectivo parcialmente y lo que se requiere en estos casos es eficiencia constante.

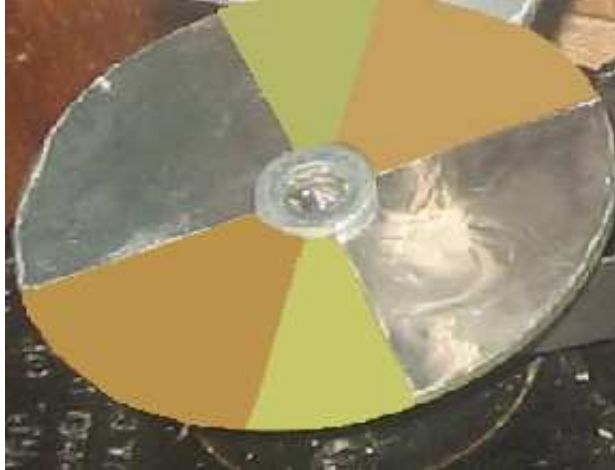
El procedimiento que se siguió para la identificación de la dinámica del motor fue el siguiente:

Se adaptó un disco que posee dos bandas metálicas en el motor como se muestra en la figura 11 para tomar datos con un sensor inductivo.

#### **FIGURA 11. DISCO DE BANDAS METALICAS PARA SENSOR INDUCTIVO**

---

<sup>1</sup> **TAMAYO GARCIA, Augusto. Identificación de un motor de corriente continua para propósitos de análisis y diseño en sistemas de control. Pereira, 12 de febrero de 2005. Trabajo de grado (Magíster en Sistemas Automáticos de Producción). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías.**

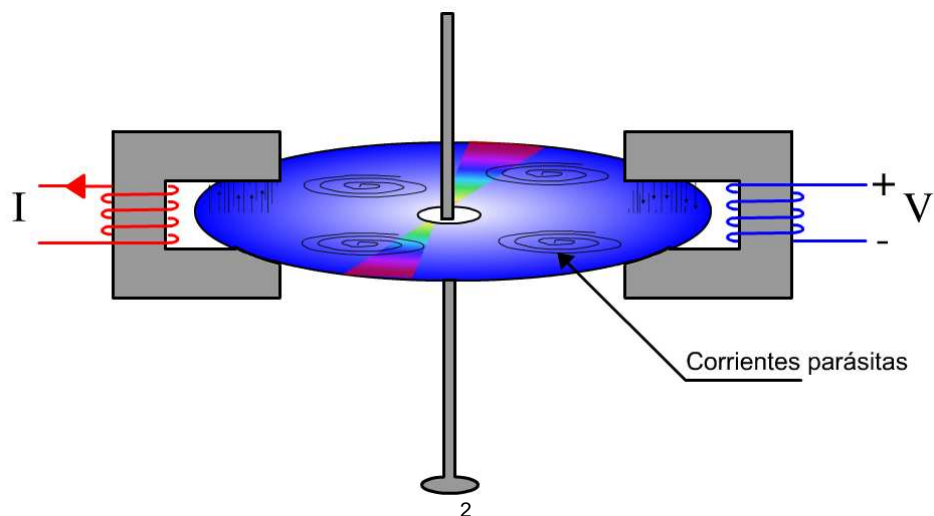


Un sensor inductivo se excita cuando se encuentra a cierta distancia de una superficie metálica.

### SENSOR INDUCTIVO

La impedancia de la bobina por la que circula una corriente alterna se ve alterada si se introduce una superficie conductora dentro del campo magnético. Su explicación es debido a que se introducen en la superficie conductora corrientes parásitas denominadas Corrientes de Foucault que se oponen al flujo de la bobina. Este fenómeno es aprovechado para la construcción de contadores eléctricos análogos. Los flujos de las bobinas de corriente y voltaje inducen en la superficie conductora o disco pequeñas corrientes, estas a su vez generan un torque en el disco que es proporcional a la energía consumida por la carga.

## Contador De Energía

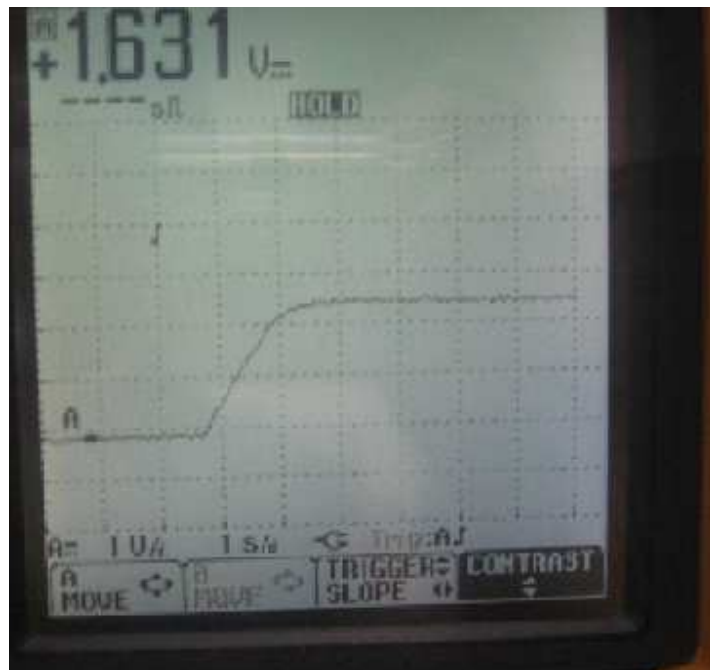


Se usó este método para encontrar la dinámica del servomecanismo, como el sensor entregaba pulsos entonces se acudió a un convertidor de frecuencia a voltaje para tener una gráfica que permitiera ver el comportamiento del servomecanismo a valores nominales de esta manera se podía ver la gráfica fácilmente en un osciloscopio, como se muestra en la figura 12.

---

<sup>2</sup> OROSCO GUTIÉRREZ, Álvaro Ángel; GONZÁLEZ OCAMPO, Juan Antonio y HOLGUIN LONDOÑO, Germán Andrés. Medidas. Pereira, 2002. Universidad Tecnológica de Pereira. Presentación en Macro media (Flash).

FIGURA 12. DINÁMICA DEL SERVOMECANISMO VISTA EN UN OSCILOSCOPIO PORTATIL



## 6. EL SENSOR

Ya se sabe que el camino mas práctico para obtener buenos resultados es el color de la llama, pero el nuevo interrogante se hizo presente porque se puede afirmar con toda razón que la llama azul tiene mayor temperatura que la llama amarilla, el problema es que un sensor de temperatura como una termocupla no puede ser sometido a tan altas temperaturas (hasta de 1300° C) y si se aleja del dispositivo perdería precisión y tratando con algo tan serio como emisiones de monóxido de carbono un error de precisión o sensibilidad en el sensor puede ser mortal.

Un sensor perfecto para desempeñar esta tarea tan importante es un sensor de radiación ya que un cuerpo irradia diferente a medida que su temperatura cambia, característica que se aprovecha con creces en este proyecto.

### TERMÓMETROS INFRARROJOS.

Los termómetros infrarrojos son elementos que captan la energía en forma de ondas electromagnéticas en la zona del espectro situada inmediatamente después de la zona roja de la radiación

visible (ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos).

## ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La luz es una onda electromagnética constituida por un campo eléctrico y un campo magnético que vibran u oscilan perpendicularmente entre si, la distancia entre las crestas adyacentes de una onda se denominan longitud de onda, el numero de veces que una onda oscila cada segundo y se le denomina frecuencia.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas).

El espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.<sup>3</sup>

La tabla 2 muestra el espectro electromagnético, con sus longitudes de onda, frecuencias y energías de fotón:

---

<sup>3</sup> Microsoft © Encarta © 2006. © 1993-2005 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.



**TABLA 2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**

	<b>Longitud de onda (<u>m</u>)</b>	<b>Frecuencia (<u>Hz</u>)</b>	<b>Energía (<u>J</u>)</b>
<u>Rayos gamma</u>	< 10 pm	>30.0 EHz	>19.9E-15 J
<u>Rayos X</u>	< 10 nm	>30.0 PHz	>19.9E-18 J
<u>Ultravioleta</u> Extremo	< 200 nm	>1.5 PHz	>993E-21 J
<u>Ultravioleta</u> Cercano	< 380 nm	>789 THz	>523E-21 J
<u>Luz Visible</u>	< 780 nm	>384 THz	>255E-21 J
<u>Infrarrojo</u> Cercano	< 2.5 $\mu$ m	>120 THz	>79.5E-21 J
<u>Infrarrojo</u> Medio	< 50 $\mu$ m	>6.00 THz	>3.98E-21

			J
<u>Infrarrojo</u> Lejano/submilimétrico	< 1 mm	>300 GHz	>199E-24 J
<u>Microondas</u>	< 30 cm	>1.0 GHz	>1.99e-24 J
Ultra Alta Frecuencia <u>Radio</u>	<1 m	>300 MHz	>1.99e-25 J
Muy Alta Frecuencia <u>Radio</u>	<10 m	>30 MHz	>2.05e-26 J
<u>Onda Corta Radio</u>	<180 m	>1.7 MHz	>1.13e-27 J
<u>Onda Media (AM) Radio</u>	<650 m	>650 kHz	>4.31e-28 J
<u>Onda Larga Radio</u>	<10 km	>30 kHz	>1.98e-29 J
Muy Baja Frecuencia <u>Radio</u>	>10 km	<30 kHz	<1.99e-29 J

**FIGURA 13. SENSOR DE RADIACIÓN**

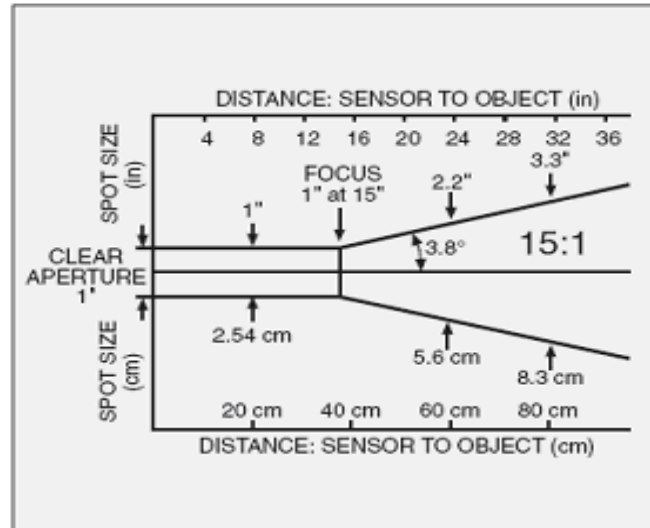


Este sensor, se caracteriza por entregar corriente a la salida.

Este sensor fue fabricado por omega, existen muchos sensores ópticos o de radiación infrarroja pero en este caso se utilizó uno en especial. Tiene en una referencia: 0S65-MA1-R12-3 (NEMA 4) donde se puede concluir que tiene un rango de salida entre 4 y 20 mA, tiene un rango de temperatura de 0 a 500 grados centígrados y una opción óptica de 15:1.

**FIGURA 14. DISTANCIA DEL SENSOR A LOS OBJETOS**

### Optics Code-3



Una de las características más importantes de este sensor óptico es una respuesta rápida alrededor de 300 milisegundos (ms), es muy seguro y fácil de instalar, es un sensor que no tiene contacto directo con la llama sino a distancia, su medida no es difícil de manipular, por las características anteriormente mencionadas se puede concluir que es realmente barato además de tener la calidad de omega este sensor tiene diversos usos por esta razón se considera relativamente económico.

Interconectado cable y tarjeta electrónica y es ideal para las aplicaciones donde se necesite adquisición de radiación (como es conocido todo elemento produce radiación y tiene una frecuencia respectiva y una longitud de onda correspondiente), pueden montarse en cualquier posición y en ambientes hostiles sin sufrir cualquier pérdida en actuación, y es una unidad de la serie OS65 de omega.

## **7. EL CONTROL**

Ya se conocían varias formas de realizar el control de los niveles de monóxido de carbono al sistema a gas, pero se enfocó el trabajo a el método que se consideró más práctico de todos, que es el de corregir la entrada de aire del mechero basándose en el resultado esperado, es decir, que el autómata este en constante vigilancia que el valor de corriente que entregue el transductor este siempre dentro de un rango si no es así que permita que el servomecanismo actúe hasta que el autómata perciba un valor de corriente que este dentro del rango que se le indicó a través de la programación.

#### 7.1. IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA DE LA LLAMA CON EL MOTOR OPERANDO A VALORES NOMINALES

Programa en lenguaje de instrucciones para autómatas programables S7 para la adecuación de medida de la variable del proceso.

- Resolución del modulo analógico del modulo AI SM331 igual a 8500.
- Rango de medida de 4-20 mA.

L PEW 304

ITD

DTR

L 8.500000e+003

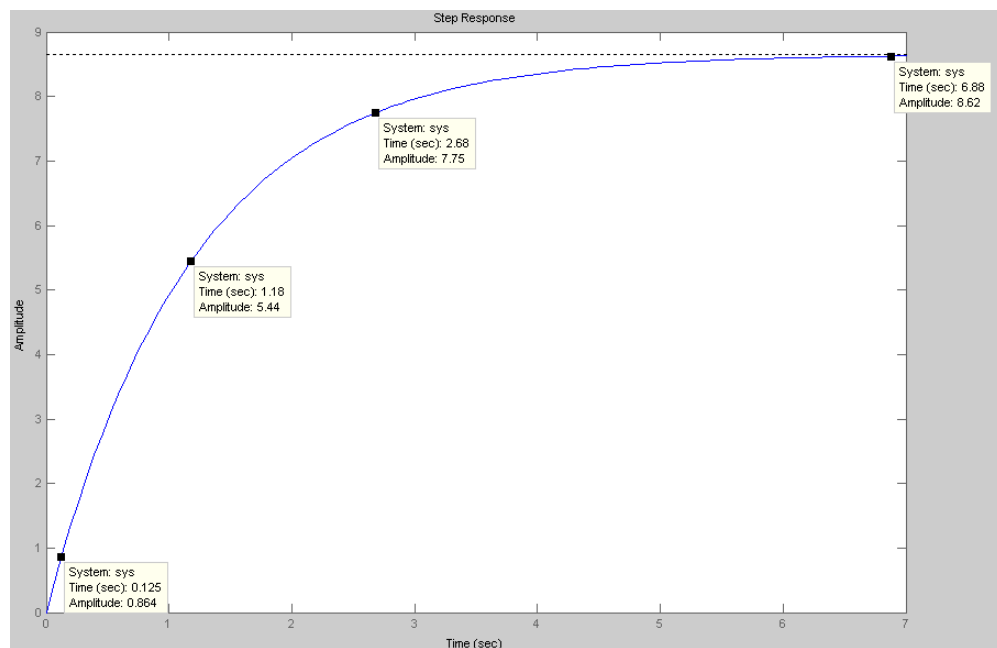
/R

L 8.500000e+002

\*R

T DB4.DBD 2

**FIGURA 15. DINÁMICA DEL SISTEMA A LAZO ABIERTO**



Es una presentación de respuesta del sistema a entrada sinusoidal a frecuencia variable. Se definen como las diferencias de magnitud y fase entre las ondas sinusoidales de entrada y salida.

Cuando se diseña por este método interesa predecir el comportamiento.

Para predecir performance a lazo cerrado a partir de la respuesta en frecuencia a lazo abierto, se necesita tener en la cuenta los siguientes conceptos.

- El sistema debe ser estable a lazo abierto (Gm grande), como se vio en la anterior grafica Gm es igual a infinito.
- Si la frecuencia de cruce de ganancia es menor que frecuencia de cruce (Wgc < Wpc), el sistema a lazo cerrado será estable.

Con el análisis de la siguiente grafica que se obtuvo en SIMATIC, se hallaron los siguientes parámetros:

Yss (valor en estado estable) = 8.65 mA

Ts = 2.5 seg.

Como  $\tau = 63.22\%$  de Yss(t) en amplitud lo cual permite ver el valor de  $\tau$ .

Esto fue  $\tau = 1.187$  seg.

La relación entre  $\tau$  y  $a$  es  $\tau = \frac{K}{a}$  por lo tanto  $a = 0.842459$

Como el Tr esta entre el 10% y 90% del valor en estado estable (Yss).

Entonces Tr es 1.816 seg.

$$Y_{ss}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (t) = S * Y_{S \rightarrow \infty} (s) = \frac{K}{a} \quad \text{entonces } k = 7.28727035$$



Dado que la función de transferencia de primer orden sin retardo es:

$$G(s) = \frac{K}{s + a}$$

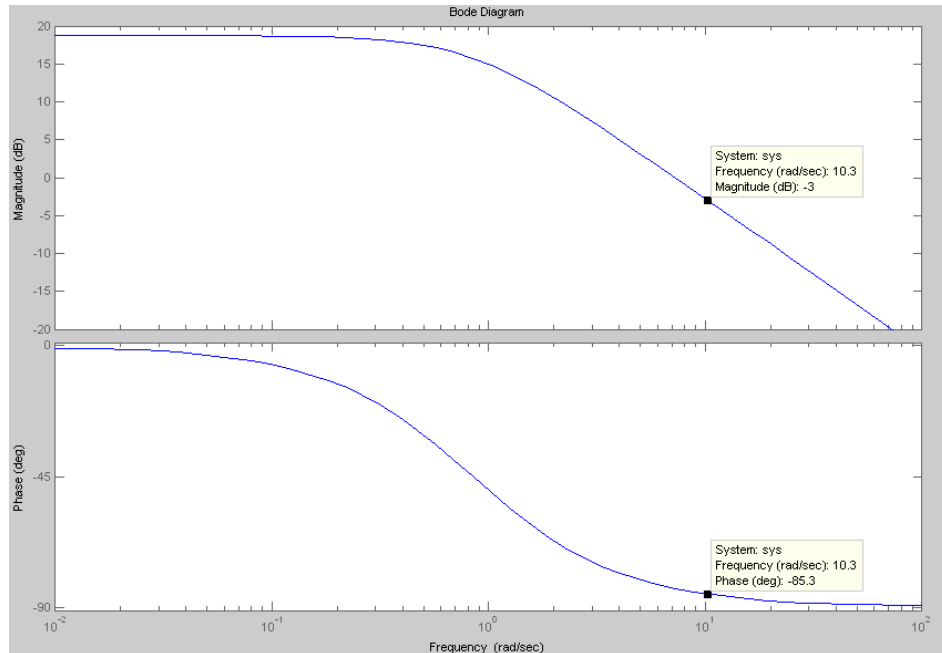
Entonces nuestra función queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{7.28727035}{(s + 0.842459)}$$

Como se puede ver por diagramas de Nyquist o diagrama de bode (grafica de magnitud y fase).

Se usa bode= (num,den): entrega los resultados en escala logarítmica, fase en grados y ganancia en decibeles.

**FIGURA 16. DIAGRAMA DE BODE**



Parámetros:

- Margen de ganancia: cambio en la ganancia a lazo abierto necesario para inestabilizar el sistema.

Si es muy grande significa que puede tolerar mayores cambios en los siguientes parámetros.

- Margen de fase: cambio de fase a lazo abierto necesario para inestabilizar el sistema a lazo cerrado. Este parámetro mide la tolerancia del sistema a retardos.

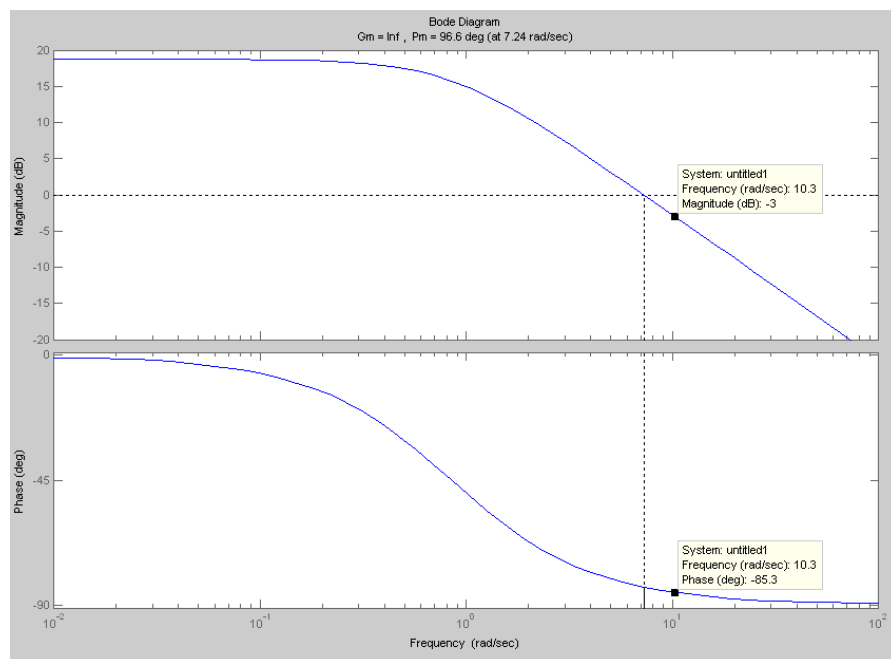
La función en MATLAB para obtener el margen de fase y el margen de ganancia es `margin(num,dern)`.

Gm= margen de ganancia.

Pm= margen de fase.

Ancho de banda: frecuencia a la cual la respuesta en magnitud lazo cerrado es igual a -3dB

**FIGURA 17. MARGEN DE FASE Y MARGEN DE GANANCIA**



Teniendo en cuenta los criterios de diseño, se escogió un sobrepaso del 3% y hallamos el valor de  $\xi$ , así:

$$3\% \text{Yss} = \text{spaso} = 0.21861$$

$$\xi = \frac{-\log(\text{spaso} / 100)}{\sqrt{\pi^2 + \log(\text{spaso} / 100)^2}} = 0.8898$$

$$P_m = \xi * 100 = 88.98$$

$$T_r = 1.8/B_w = 0.017475 \text{ seg.}$$

Y se espera que las graficas en lazo cerrado con control satisfagan los criterios de diseño, y como se observó en las graficas a lazo abierto sin hacerle control ya cumplen con las exigencias del diseño, sin embargo es necesario cerrar el lazo para lograr una estabilidad en la dinámica del sistema.

Se mira en la grafica  $G_m$  y  $P_m$  entonces se calcula  $\xi$  y el sobrepaso (os) asi:

$G_m = \infty$  lo cual es muy bueno, ya que si es muy grande significa que puede tolerar mayores cambios en los siguientes parámetros

$$P_m = 96.6$$

$$\xi = P_m/100 = 0.966$$

$$ess = \frac{1}{1 + K_p} = 0.12066$$

$$\%ess = ess * 100 = 12.66\%$$

Diseño del controlador PI

Se modifican las ganancias  $K_i$  y  $K_p$  de tal forma que se obtuviera un margen de fase y un ancho de banda mayor o igual a los hallados anterior.

El programa en matlab

```
num = [7.28727035]
den = [1 0.842459 ]
numpi= valor de kp * [1 (valor de kp sobre ki) ]
denpi=[1 0]
newnum= conv(num,numpi)
newden= conv(den,denpi)
[numc,denc] = cloop(newnum,dennew,-1);
Step (numc,denc)
```

Kp= 8

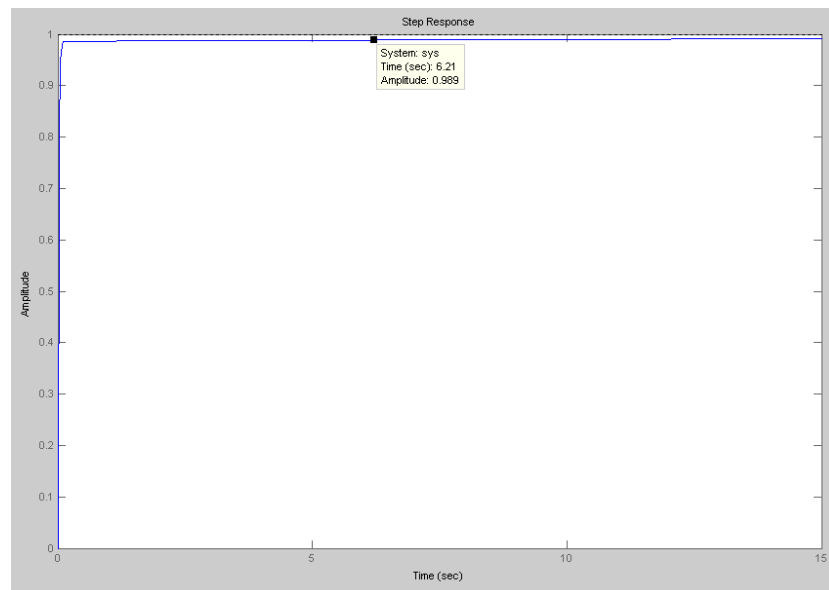
Ki= 0.25

(kp y ki) Datos que se variaron hasta encontrar un ancho de banda y un margen de fase mayores o iguales a los anteriores.

Variando estos valores de ganancia proporcional e integral obtuvimos unos resultados que aunque no satisfacen completamente las exigencias de diseño, si cumplen con nuestras expectativas ya que el sistema que se le hizo control tiene una dinámica muy buena en cuanto a error se trata.

Los valores encontrados fueron kp=8 y ki=0.25

**FIGURA 18. DINÁMICA DEL SISTEMA A LAZO CERRADO CON CONTROL**

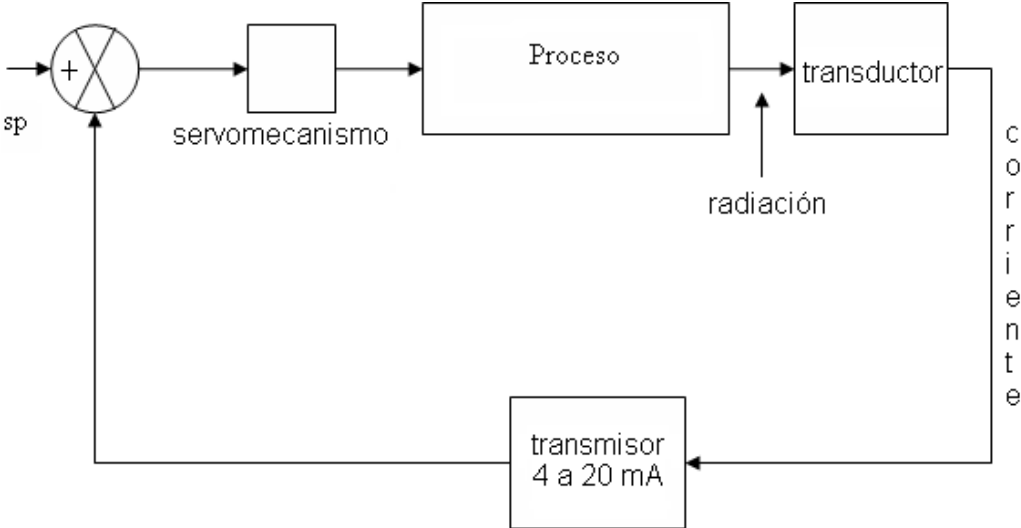


La grafica anterior permite ver la estabilidad que se logra en un tiempo de subida muy bajo.

## 7.2. ESQUEMA DE CONTROL

El esquema de control muestra de una forma didáctica las etapas del proceso de control, mencionando factores primordiales de manera global e indicando el orden de participación de dichas etapas permitiendo entender el proceso fácilmente. Ver figura19.

**FIGURA 19. ESQUEMA DE CONTROL**



## **8. ALGORITMO**

Teniendo el prototipo construido y teniendo el conocimiento acerca de cómo debería funcionar, bastaba con realizar una programación indicada a la máquina encargada de hacer la tarea de constante vigilancia y control del sistema a gas de esto se encargará un autómata programable.

Los Controladores Lógicos Programables (PLC's), también llamados autómatas programables, forman parte de la familia de los ordenadores. Se usan en aplicaciones comerciales e industriales. Un autómata motoriza las entradas, toma decisiones tomadas en su programa, controla las salidas para automatizar un proceso o máquina. Este curso trata de suministrar la información básica sobre las funciones y las configuraciones del autómata programable.

**FUNCIONAMIENTO BÁSICO.**



Un autómata programable consiste en módulos de entrada, una CPU, y módulos de salida. Una entrada acepta una gran variedad de señales analógicas o digitales de varios dispositivos de campo (sensores) y los convierte en una señal lógica que puede usar la CPU. La CPU toma las decisiones y ejecuta las instrucciones de control basadas en las instrucciones del programa de la memoria. Los módulos de salida convierten las instrucciones de control de la CPU en una señal digital o analógica que se puede usar para controlar dispositivos de campo (actuadores). Se usa un dispositivo de programación para introducir las instrucciones deseadas. Estas instrucciones especifican lo que debe hacer el autómata según una entrada específica. Un dispositivo operador permite procesar la información para ser visualizada e introducir nuevos parámetros de control.<sup>4</sup>

## 8.1. LA PROGRAMACIÓN

Como el autómata se le indica que hacer y ejerce control en un elemento físico, entonces debe tener dos tipos de programación, una que le indica cuales entradas y salidas son las que se van a usar, que autómata y que módulos se conoce como la programación del hardware por software. El otro tipo de programación es la que indica la forma en que el autómata va a trabajar.

### CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE POR SOFTWARE

---

<sup>4</sup> TUTORIAL STEP-7.pdf. Manual de Programación en Simatic S7. Nov 10 2003, 152 Págs.

Primero se debe especificar con que CPU se esta trabajando, que entradas y salidas tiene, solo hay que escogerlas en una lista esperando ver la referencia que vemos inscrita en cada modulo y buscarla la indicada en las opciones que el programa presenta, en la figura 16 se muestra la configuración del hardware por software.

**FIGURA 20. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO**

Slot	Módulo	Referencia	Fir...	Direcci...	Direcció...	Direcci...	Comentario
1							
2	CPU314(1)	6ES7 314-1AE04-0AB0		2			
3							
4	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			0...3		
5	DO16xAC120V/0.5A	6ES7 322-1EH01-0AA0				4...5	
6	AO4x12Bit	6ES7 332-5HD01-0AB0				288...295	
7	AI8x12Bit	6ES7 331-7KF01-0AB0			304...319		
8							

El PROGRAMA

Consiste en cargar el autómata con la resolución, indicarle los pulsos que debe enviar cada vez que actúe y dentro de que rango de tiempo, en establecer un valor o un rango que siempre este comparando con la señal que envía el sensor de radiación y si el valor que envía el sensor es mayor o menor, el autómata debe actuar para corregir. El valor se llama set point "SP\_INT " y el rango en el cual no debe actuar se llama banda muerta "DEADB\_W".

Ciertos elementos del programa no se necesitan y son los que a continuación aparecen en "false".

```
L PEW 304
  ITD
  DTR
  L 2.764800e+004
  /R
  L 2.000000e+001
  *R
  L 4.000000e+000
  +R
  T DB1.DBD 2

CALL "CONT_C" , DB2
COM_RST :=FALSE
MAN_ON :=FALSE
PVPER_ON:=FALSE
P_SEL :=TRUE
I_SEL :=TRUE
INT_HOLD:=FALSE
I_ITL_ON:=FALSE
```

D\_SEL :=FALSE  
CYCLE :=T#1MS  
SP\_INT :=8.700000e+000  
PV\_IN :=DB1.DBD2  
PV\_PER :=W#16#0  
MAN :=0.000000e+000  
**GAIN :=8.000000e+000**  
**TI :=T#4S**  
TD :=T#0MS  
TM\_LAG :=T#0MS  
DEADB\_W :=5.400000e-001  
LMN\_HLM :=1.000000e+002  
LMN\_LLM :=0.000000e+000  
PV\_FAC :=1.000000e+000  
PV\_OFF :=0.000000e+000  
LMN\_FAC :=1.000000e+000  
LMN\_OFF :=0.000000e+000  
I\_ITLVAL:=0.000000e+000  
DISV :=0.000000e+000  
LMN :=DB1.DBD6  
LMN\_PER :=  
QLMN\_HLM:=  
QLMN\_LLM:=  
LMN\_P :=  
LMN\_I :=  
LMN\_D :=  
PV :=  
ER :=DB1.DBD10

```
CALL "PULSEGEN" , DB3
INV :=DB1.DBD6
PER_TM :=T#30MS
P_B_TM :=T#10MS
RATIOFAC:=1.000000e+000
STEP3_ON:=FALSE
ST2BI_ON:=FALSE
MAN_ON :=FALSE
POS_P_ON:=FALSE
NEG_P_ON:=FALSE
SYN_ON :=TRUE
COM_RST :=FALSE
CYCLE :=T#10MS
QPOS_P :=A4.2
QNEG_P :=
BE
```

## **CONCLUSIONES**

- Se ratificó que la tecnología eléctrica como las ventajas del control automático de procesos pueden hacer grandes aportes al medio ambiente.
- Se demostró una vez más que un sistema de control puede cumplir eficientemente una labor importante así sea repetitiva, de mucho cuidado y con requerimientos de precisión altos.
- Se identificaron diferentes formas de realizar el control para minimizar los niveles de monóxido de carbono.
- Se encontró un dato crucial para la realización del proyecto, consiste en el saber que el color de llama esta estrechamente relacionado con las emisiones de monóxido de carbono en sistemas a gas natural.
- Se eligió un método muy práctico y sencillo de control.
- Se encontró un sistema a gas natural de fácil manejo y bastante útil para el propósito demostrativo del proyecto.
- Se eligió un sensor adecuado que ayuda a identificar indirectamente emisiones de monóxido de carbono.
- Se modificó un sistema a gas natural con el fin de hacerle control automático.
- Se elaboró una programación adecuada del autómata.
- Se validó el proyecto al demostrar físicamente que el control realizado funciona, disminuyendo en lo posible los niveles de monóxido de carbono.

- Se controló los niveles de monóxido de carbono en un sistema a gas natural.

## RECOMENDACIONES

El sistema construido puede tener varias mejoras, tanto en la parte física como en el programa del autómeta como:

- Un modo seguro de encendido, es decir que el propio sistema tenga encendido automático y solo empiece a enviar gas cuando haya llama.
- Un modo seguro de apagado, es decir que el propio sistema detenga el envío de gas cuando por cualquier motivo se extinga la llama.
- Que el programa tenga opciones de tiempo, es decir que el usuario pueda manipular el tiempo de funcionamiento del sistema.
- Como la presión del gas debe ser constante, es pertinente tener un medidor de presión que entregue una señal eléctrica la cual se debe tomar como parte fundamental de la programación porque el sistema se hace aún más confiable.



## **BIBLIOGRAFÍA**

Microsoft ® Encarta ® 2006. © 1993-2005 Microsoft Corporación. Reservados todos los derechos.

TAMAYO GARCIA, Augusto. Identificación de un motor de corriente continua para propósitos de análisis y diseño en sistemas de control. Pereira, 12 de febrero de 2005. Trabajo de grado (Magíster en Sistemas Automáticos de Producción). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías.

OROSCO GUTIÉRREZ, Alvaro Ángel; GONZÁLEZ OCAMPO, Juan Antonio y HOLGUIN LONDOÑO, Germán Andrés. Medidas. Pereira, 2002. Universidad Tecnológica de Pereira. Presentación en Macromedia (Flash).

TUTORIAL STEP-7. pdf. Manual de Programación en Simatic S7. Nov 10 2003, 152 Págs.