

**CARACTERIZACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS MICRO-REDES EN
COLOMBIA**

Carlos Eugenio Obando Pérez

**Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título en
Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Eléctrica
Pereira
Diciembre 2021**

CONTENIDO

	Pág
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.2 OBJETIVOS	6
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	6
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2. MICRO-REDES	7
2.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍAS RENOVABLES (FNCR) EMPLEADAS EN LAS MICRO-REDES	7
2.2. ENERGÍA EÓLICA	8
2.2.1. AEROGENERADOR	10
2.3 SISTEMAS DE GENERACIÓN HÍBRIDA	12
2.3.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍBRIDO	12
2.4 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA SFV	13
2.5. ENERGÍA DE BIOMASA AGRÍCOLA Y FORESTAL	21
2.6. ENERGÍA GEOTÉRMICA	22
2.7. SISTEMAS DE ACUMULACION DE ENERGÍA	23
2.7.1. CENTRALES DE BOMBEO	24
2.7.2. BATERÍAS	24
2.7.2.1. PLOMO-ÁCIDO	25
2.7.2.2. METAL-AIRE	26
2.7.2.3. SODIO-AZUFRE (Na – S)	27
2.7.2.4. REDOX VANADIO	27
2.7.2.5. ION LITIO	29
2.7.2.6. ZINC-BROMURO (ZnBr)	30
2.7.3. VOLANTES DE INERCIA (Flywheels).	31
2.7.3.1. ELEMENTOS DE UN ACUMULADOR CINÉTICO	32
2.7.3.2. APLICACIONES	35
2.7.4. BOBINAS ELECTROMAGNÉTICAS SUPERCONDUCTORAS O SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE (SMES).	36
2.7.5. AIRE COMPRIMIDO (CAES)	36
2.7.6. SUPERCONDENSADORES	37

3.	REGULACIÓN VIGENTE EN COLOMBIA	39
3.1.	REGULACIÓN EN OTROS PAÍSES	40
3.1.1.	MÉXICO.	40
3.1.2.	CHILE	41
3.1.3.	ECUADOR	41
3.1.4.	ARGENTINA	41
3.1.5.	REPÚBLICA DOMINICANA	42
3.1.6.	COSTA RICA	42
3.1.7.	URUGUAY	42
4.	EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN MICRO-REDES	43
4.1.	CANADÁ	43
4.2.	ESTADOS UNIDOS	43
4.3.	HOLANDA	43
4.4.	ALEMANIA	43
4.5.	REINO UNIDO	44
4.6.	JAPÓN	44
5.	CONCLUSIONES	45
	BIBLIOGRAFÍA	46

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

Es importante para el país fomentar el uso de energías alternativas y de micro-redes, por cuanto ofrecen la posibilidad de abastecer con energía eléctrica a zonas marginales y a las zonas no interconectadas, necesaria para mejorar las condiciones de vida de poblaciones alejadas de los centros de generación o que se han visto afectadas por fenómenos de violencia.

Las energías alternativas permiten al país estar mejor preparado para afrontar situaciones energéticas críticas provocadas por el fenómeno del niño y los cambios climáticos al no depender en un porcentaje tan alto de un sólo tipo de generación de energía, diversificando la matriz de generación.

El uso de energías renovables genera un aporte significativo al medio ambiente, por cuanto se reducen las emisiones de CO₂ y las afectaciones sociales y al paisaje natural presentes en el desarrollo de grandes proyectos de generación hidráulica. Se agilizan los trámites, sobre todo en lo relacionado a las licencias ambientales para proyectos con micro-redes, pues los grandes proyectos de generación hidráulica se encuentran con gran oposición por parte de las comunidades del área de influencia por la afectación a los paisajes, como ocurre en el Quindío con el paisaje cultural cafetero.

La implementación de micro-redes en Colombia enfrenta varios desafíos. Falta regulación clara que motive a los grandes inversionistas a desarrollar proyectos significativos. La difusión y el conocimiento técnico de las nuevas tecnologías son escasos. Los costos en la infraestructura necesaria aún son elevados. Existen zonas donde las condiciones de seguridad no permiten el acceso para desarrollar este tipo de proyectos. Se espera que con la firma del proceso de paz, se subsane esta situación. Desde el punto de vista técnico, se pueden presentar inconvenientes con el Sistema Interconectado Nacional, en cuanto a inyección de armónicos, coordinación de protecciones, etcétera, que podrían desencadenar, incluso, fallos en cascada. A nivel mundial se ha venido estudiando diversas formas de acoplar las micro-redes a los sistemas de generación existentes de manera efectiva. Sin embargo, es todo un paradigma que involucra variadas disciplinas, tales como, comunicaciones, protecciones, mercados de energía, entre otros.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las micro-redes son tecnologías que permiten el uso de energías alternativas para variadas aplicaciones, entre ellas, alimentar zonas no interconectadas; sin embargo, los materiales y elementos con los que se construyen no son de fácil acceso debido a su alto costo, disponibilidad en el país, falta de difusión de las tecnologías, entre otras.

Otro inconveniente presentado es al momento de acoplar todas estas micro-redes al sistema interconectado nacional, debido a que se podrían presentar problemas de coordinación de protecciones entre los sistemas, inyección de armónicos, inconvenientes de flujo de carga, desbalances de frecuencia, entre otros, que podrían llegar a provocar serios daños o colapsos del sistema completo.

Actualmente en el país se cuenta con poca regulación y legislación respecto a micro-redes y energías alternativas, lo que desmotiva las inversiones a gran escala, dejando de ser atractivo para los grandes inversionistas que busquen soluciones macro con este tipo de tecnologías, además hay pocos incentivos al disminuir el impacto ambiental por consumo de energías no renovables.

Se espera que con la firma definitiva del Acuerdo de Paz, se facilite el acceso a zonas vedadas en el país que requieren de este tipo de tecnologías para lograr confiabilidad en el suministro de energía eléctrica y propender por la articulación con proyectos productivos que revitalicen a estas poblaciones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar las micro-redes en Colombia desde varios aspectos, incluyendo el técnico, el económico, el de legislación y el de regulación.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las diferentes tecnologías asociadas con las micro-redes.
- Comparar la regulación vigente en Colombia y otros países sobre micro-redes.
- Analizar técnica y económicamente la factibilidad de la implementación de una micro-red en el Sistema Eléctrico Colombiano.

CAPÍTULO 2. MICRO-REDES

Las micro-redes son conjuntos de pequeños generadores que pueden integrar diversas fuentes y tecnologías y que pueden operar en modo aislado o acoplados al sistema interconectado. En nuestro país se han hecho esfuerzos importantes con fuentes como la eólica, la solar fotovoltaica y la biomasa, funcionando como islas.

Actualmente el paradigma mundial es volcarse hacia las redes inteligentes, donde las micro-redes son acopladas al sistema interconectado y los flujos de potencia son en diversas direcciones. Los usuarios pueden determinar a quién le compran la energía, o si en un momento dado tienen excedentes, inyectarlos al sistema.

Este paradigma implica cambios en varios frentes, empezando por la legislación para permitir el acceso de “pequeños” generadores; desde los aspectos técnicos, al presentarse flujos de potencia en diversas direcciones; también involucra aspectos de comunicación, al permitir que los usuarios tengan comunicación en doble vía, para poder ser consumidores en un momento dado y generadores en otros; implica aspectos de control, pues los sistemas actuales enfrentan retos para asimilar a estos pequeños y diseminados generadores que introducen fenómenos de armónicos y de calidad de energía.

2.1 FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍAS RENOVABLES (FNCR) EMPLEADAS EN LAS MICRO-REDES

Las energías renovables se obtienen de fuentes naturales consideradas inagotables, por la gran cantidad de energía que contienen o porque se regeneran por medios naturales. Entre las energías renovables se tienen: eólica, solar fotovoltaica, hidroeléctrica, mareomotriz, undimotriz, geotérmica, biomasa y biocombustibles.

Las energías renovables se han convertido en una gran alternativa desde el punto de vista económico, técnico y ambiental, para abastecer con energías limpias las zonas alejadas y reducir el impacto ambiental de grandes proyectos de generación.

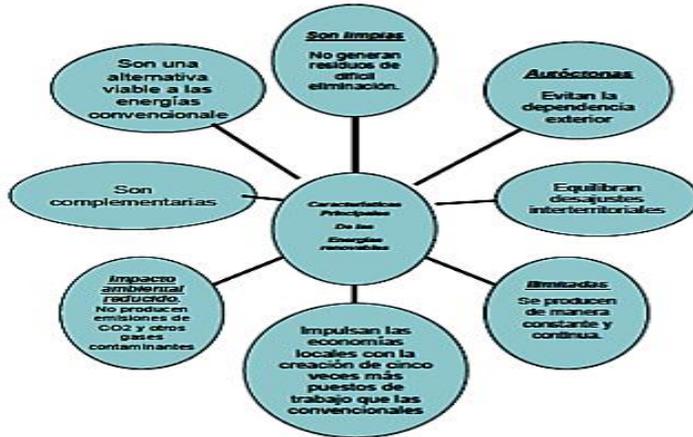


Fig 1. Características principales de las Energías Renovables
 (Imagen tomada de [<http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1311>])

La UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) plantea que las energías renovables cubren aproximadamente el 20% del consumo mundial de electricidad.

En Colombia se destacan proyectos en generación eólica y en energía solar para aplicaciones rurales, torres de comunicación y señales de tránsito. Se espera un avance en la regulación que motive el ingreso de actores fuertes a este mercado.

2.2. ENERGÍA EÓLICA.

Consiste en aprovechar la fuerza del viento para mover unos aerogeneradores que van acoplados a unos generadores mecánicos de energía eléctrica. En sus inicios se empleaban generadores con aspas demasiado robustas y de gran envergadura, que requerían grandes inversiones y que creaban un gran impacto ambiental en las zonas de influencia. Actualmente se están empleando generadores más pequeños para atender necesidades puntuales de las comunidades. También se están desarrollando generadores verticales, compactos y silenciosos para ser ubicados en las azoteas de los grandes edificios.

Los proyectos eólicos tienen poca afectación ambiental, pero sus altos costos de instalación los hacen menos atractivos frente a otras tecnologías. Dentro de sus principales aplicaciones se tiene:

- Sistemas de bombeo hidráulico para cultivos en zonas aisladas.

- Electrificación de viviendas aisladas.
- Venta de electricidad al sistema interconectado, mediante la creación de parques eólicos.

Hay tres componentes del viento que deben tenerse en cuenta para medir su potencial energético:

Densidad del aire, velocidad y dirección del viento. En donde la potencia está dada por

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3$$

La medición del viento debe hacerse como mínimo durante un año en la zona donde se pretende realizar un proyecto. En Colombia existe información registrada, hallándose que la Guajira es la mejor zona para este tipo de tecnología.

Para aprovechar de buena manera la energía eólica se deben determinar con precisión variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad con la altura sobre el suelo, las ráfagas en espacios breves y los valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años, y la velocidad máxima.

Se requiere una velocidad entre 12 km/h y 65 km/h para un buen aprovechamiento del viento. Este recurso es renovable, abundante y limpio. Permite reducción en emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar fuentes de generación con combustibles fósiles, como también reducción de partículas suspendidas en el aire y disminución de efectos como lluvia ácida.

Algunos de los inconvenientes que presenta este tipo de energía son:

- Turbinas ruidosas.
- Posible choque de aves con los aerogeneradores.
- Posibilidad de interferencias en señales de radio por presencia de campos electromagnéticos.
- La baja densidad de energía por unidad de área requiere que se instalen varios aerogeneradores conformando lo que se denomina parque eólico.

2.2.1 AEROGENERADOR

Es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. La energía eólica se origina a partir de los desplazamientos de masas de aire debidos a las diferencias de presión del aire en movimiento. Se mueve la hélice y mediante un sistema de engranajes mecánicos se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Una turbina eólica está constituida principalmente por el rotor, una caja de engranajes, (multiplicador), un generador, equipo de control y monitoreo de la torre. Estos elementos se encuentran alojados y protegidos en la góndola. La energía generada se puede consumir directamente o ser almacenada en baterías.

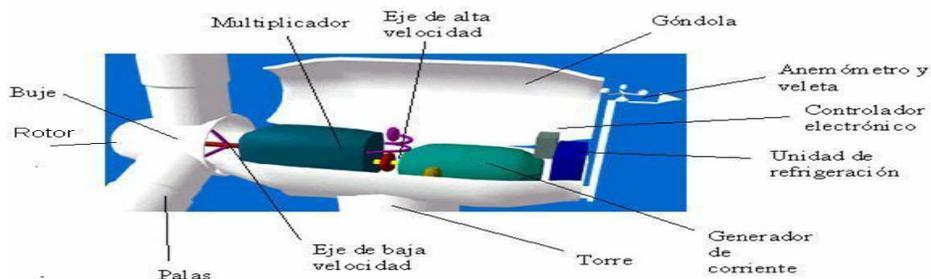


Fig 2. Elementos de un aerogenerador

(Imagen tomada de [http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html])

Los aerogeneradores se agrupan generalmente en parques eólicos ubicados entre sí a cierta distancia, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las aspas. Los sistemas se dotan con sistemas de sincronización de frecuencia y tensión para ser conectados al sistema nacional.

Las turbinas eólicas se diseñan para trabajar a velocidades del viento mayores a 5 m/s pues por debajo de esta no se logran superar las pérdidas del sistema. La velocidad superior está determinada por la capacidad del aerogenerador para soportar fuertes vientos.

Existen pequeños aerogeneradores domésticos que se emplean para generar electricidad para sistemas de riego y de iluminación en viviendas ubicadas en zonas alejadas de los sistemas de electricidad.

Un aerogenerador convierte la fuerza del viento en un momento o par mecánico que hace girar las aspas. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de factores tales como: densidad del aire, área de barrido del rotor y velocidad del viento.

En Colombia se encuentran disponibles los aerogeneradores de eje vertical. Su configuración los hace ideales para aplicaciones rurales y urbanas ofreciendo la posibilidad de autogenerar energía eléctrica a precio competitivo y con preservación del medio ambiente. Su uso se puede implementar en urbanizaciones, aún en condiciones de bajo viento.

Las turbinas para uso residencial están en el rango entre 1 kW y 10 kW. Un hogar típico consume aproximadamente 9400 kWh/año (780 kWh/mes)

Una turbina de 1.5 kW podría cubrir las necesidades en un hogar que consume alrededor de 300 kWh/mes en un sitio con velocidad promedio anual del viento de 6,5 m/s.

En la Guajira, EPM (Empresas Públicas de Medellín) instalaron un proyecto piloto de generación eólica, conocido como Jepirachi. Ha permitido profundizar en el conocimiento de la tecnología y entablar relaciones interculturales con los indígenas de la zona.

Actualmente el gobierno está promoviendo la aplicación de energías no convencionales en las zonas no interconectadas que usualmente se encuentran en territorios de comunidades especiales, con la cuales hay que interactuar bajo condiciones culturales diferentes.

Los aerogeneradores domésticos brindan una fuente práctica y económica de electricidad, siempre y cuando se cuente con un buen recurso eólico, exista cercanía entre la generación y el consumo, las normas de la comunidad permitan la instalación de las turbinas y se pueda realizar una inversión de largo plazo.

2.3 SISTEMAS DE GENERACIÓN HÍBRIDA

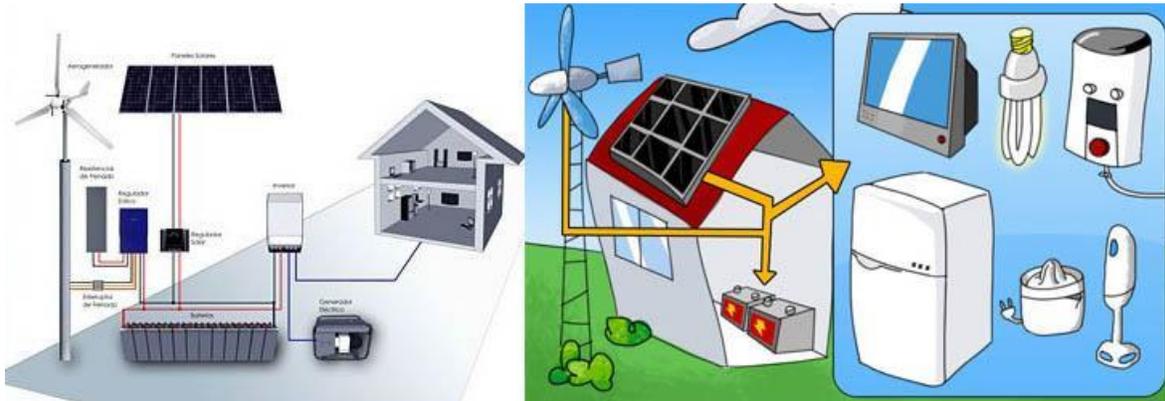


Fig 3. Generación Híbrida

(Figura tomada de <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/17/que-es-la-microgeneracion-de-energias-renovables/>)

Un sistema híbrido permite combinar diversas fuentes de energía. Eólica con diesel, o eólica con solar fotovoltaica, por ejemplo; lo que ha demostrado que ofrecen mayores ventajas que si se instalaran por separado. Durante el verano el viento sopla con menos intensidad, pero es cuando el sol brilla más intensamente y durante más tiempo al día.

Los sistemas híbridos proporcionan confiabilidad en la entrega de energías en comunidades alejadas de la red de distribución.

Un sistema híbrido es práctico si se cuenta con una velocidad promedio anual del viento de 6m/s, no existe una conexión disponible a la red de suministro, se desea independizar de la red de la compañía eléctrica o como recurso para generar energía limpia.

2.3.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍBRIDO.

Consumo bajo de energía.

Durante la noche el consumo promedio de energía disminuye y el banco de baterías o el sistema de almacenamiento seleccionado es capaz de aportar la energía suficiente.

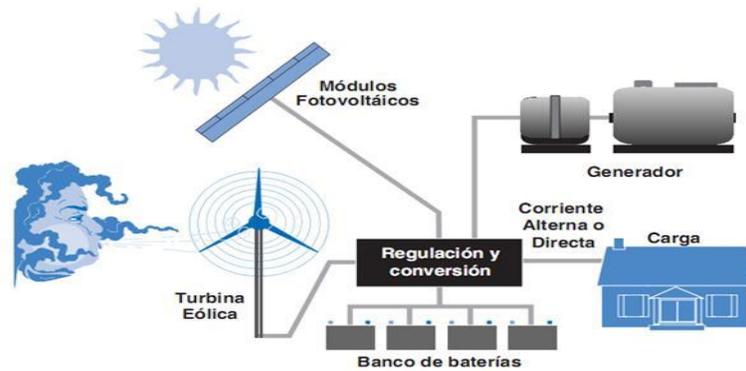


Fig 4. Interconexión de las fuentes en un sistema híbrido

(Imagen tomada de [<http://www.energiaeolica.gub.uy/index.php?page=generalidades>])

Consumo alto de energía.

Cuando hay gran consumo de energía, el inversor arranca el sistema, suministrando la energía demandada y cargando a su vez las baterías o el sistema de almacenamiento seleccionado.

Baterías cargadas.

Con las baterías cargadas y el sistema de generación detenido, el inversor alimenta la casa con la energía acumulada en las baterías.

La elección de los equipos se hace acorde a las necesidades particulares.

2.4 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA SFV.

Se emplean unos elementos llamados paneles solares que convierten la energía radiante del sol en energía eléctrica DC. Luego mediante inversores, se transforma en energía eléctrica AC que puede ser empleada directamente. También se usan bancos de baterías para almacenar la energía lograda durante el día y poder utilizarla en la noche.



Fig 5. Energía solar fotovoltaica

(Imagen tomada de [: <http://daprose.net/energia/>])

El Sol brinda una gran cantidad de energía. En su interior se generan reacciones de fusión de átomos de hidrógeno que liberan aproximadamente 390×10^{24} W. Esta energía llega a la superficie terrestre como radiación.

Esta energía es silenciosa y libre de emisiones. Su tecnología se integra fácilmente al paisaje urbano y se puede aplicar en zonas de difícil acceso.

La luz solar está compuesta por fotones que poseen diferentes niveles de energía. Estos fotones son los que excitan a la célula fotovoltaica para producir corrientes eléctricas. (efecto fotovoltaico).

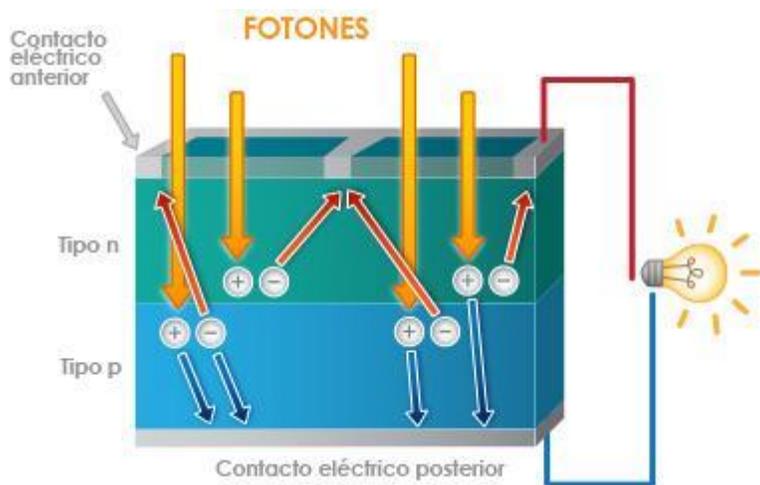


Fig 6. Efecto Fotovoltaico

(Imagen tomada de [<http://avansol.com.mx/fotovoltaiica.html>])

La luz del sol es convertida en corriente eléctrica mediante células fotovoltaicas, de material semiconductor, como por ejemplo Silicio. Se requieren varias de estas celdas conectadas para obtener una corriente significativa, los llamados paneles solares. Las células del panel están protegidas por un cristal y se construyen de manera modular para acoplarlos fácilmente entre sí.

La energía solar puede usarse para abastecer sitios aislados mediante sistemas fotovoltaicos autónomos, ahorrando costos en mantenimientos, combustibles, conexiones a la red, etc.

También puede ser asociado a un sistema interconectado a la red eléctrica, sobre todo en las ciudades o mediante la creación de granjas solares.

La energía solar depende directamente de:

- Incidencia del sol
- Horas del día en que se toma.
- Inclinación de la tierra respecto del sol.

Factores cambiantes durante el año, muy ligados a condiciones meteorológicas o de contaminación.

La energía del sol se puede aprovechar en forma de calor (térmica), en procesos de calentamiento de agua o de aire y, en forma de luz (fotovoltaica), como se ha explicado, para generar electricidad mediante paneles solares.



Fig 7. Energía solar fotovoltaica y térmica

(Imagen tomada de [<http://www.puntosolar.cl/productos-energia-solar.html>])

Actualmente se introduce el concepto de arquitectura verde en el diseño de construcciones, para aprovechar al máximo los recursos naturales disponibles (sol, viento, etc) con el objetivo de lograr construcciones autosuficientes energéticamente.

Su uso se enfoca hacia urbanizaciones, entes oficiales, sectores comerciales, residenciales e industriales.

Es una fuente con buen potencial para Colombia dados los altos niveles de radiación solar que se presentan en el país, si se tiene en cuenta que el máximo mundial es de aproximadamente 2500 kWh/m²/año y que la variación mensual de la radiación global es mucho menor; y el descenso en los precios de los equipos necesarios.

REGIONES DEL PAÍS	RADIACIÓN SOLAR (kWh/m²/año)
GUAJIRA	2000 – 2100
COSTA ATLÁNTICA	1730 – 2000
ORINOQUÍA-AMAZONÍA	1550 – 1900
REGIÓN ANDINA	1550 – 1750
COSTA PACÍFICA	1450 – 1550

Tabla 1 Potencial de la energía solar en Colombia, por regiones.

Diseño del autor

Para los sistemas aislados de la red eléctrica deben diseñarse muy bien los elementos con base en la carga a alimentar y los niveles de radiación solar de la zona. Debe usarse un regulador de carga para preservar las baterías frente a un exceso de la misma desde el generador fotovoltaico y de un exceso de descarga debido a la utilización, fenómenos que acortan la vida útil de los acumuladores.

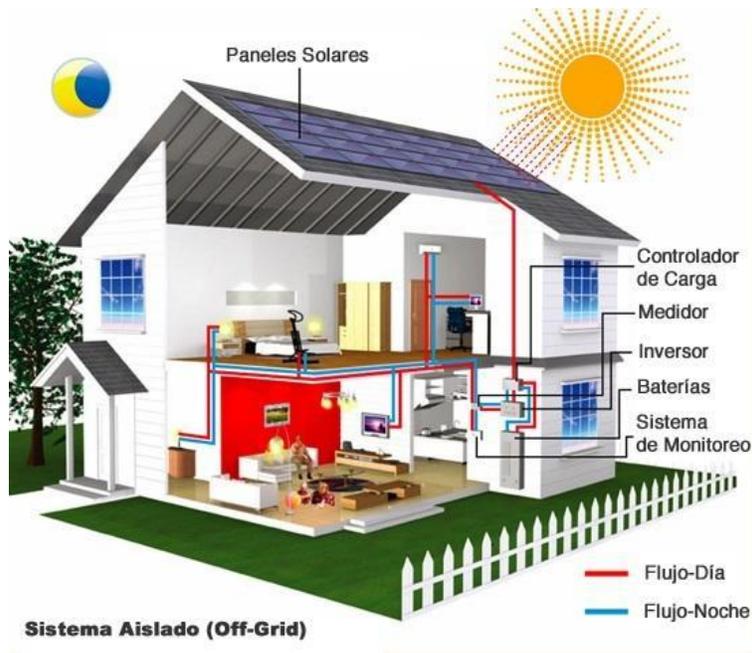


Fig 8. Sistema fotovoltaico aislado

(Imagen tomada de [: <http://www.farie.es/es/actualidad-del-autoconsumo.aspx>])

Los principales componentes de una instalación fotovoltaica son:

Módulo fotovoltaico o panel solar: Transforma la radiación solar incidente en energía eléctrica. Tienen una vida útil de aproximadamente 30 años y fácil instalación debido a su modularidad. Su potencia de salida se mide en vatios pico (Wp) y es la potencia que produce un panel fotovoltaico en condiciones de máxima iluminación solar, con una radiación de aproximadamente 1 kW/m^2 (la que se produce en un día soleado al mediodía solar).

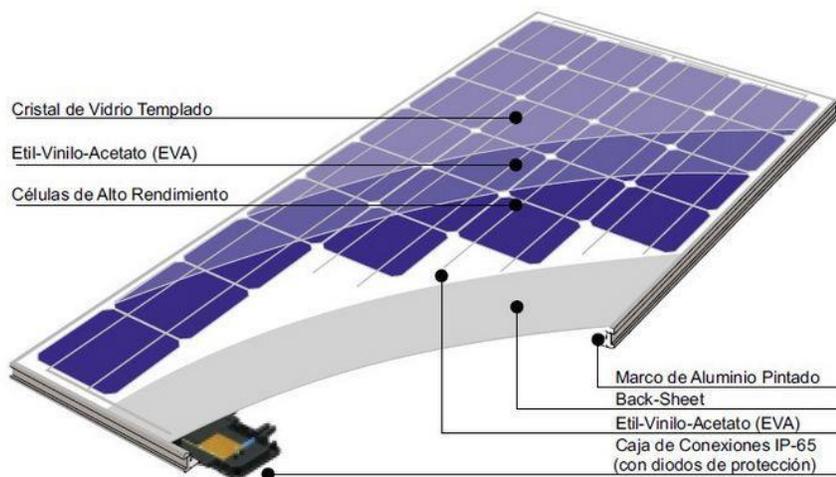


Fig 9.

(Imagen

[\[http://eliseosebastian.com/elementos-de-un-panel-solar-fotovoltaico/\]](http://eliseosebastian.com/elementos-de-un-panel-solar-fotovoltaico/))

Módulo solar
fotovoltaico
tomada de

El rendimiento de un panel depende de:

- La intensidad de la radiación luminosa a la que está siendo sometido.
- El grado de temperatura de las células solares.
- El mayor ángulo de perpendicularidad (90°) al seguimiento del sol.

La calidad de un panel solar se reconoce por su potencia nominal en vatios (W) o Kilovatios (kW). Todo panel solar fotovoltaico tiene una curva característica I – V.

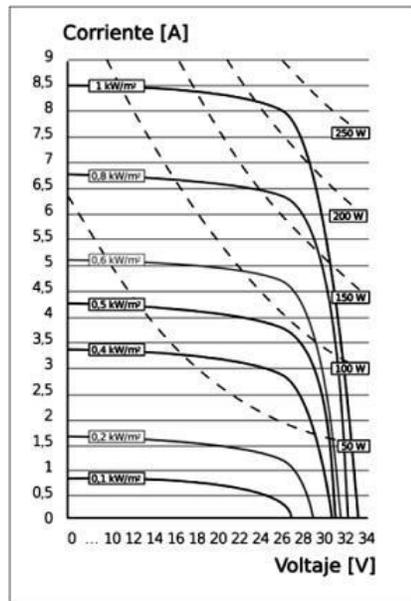


Fig 10. Curva característica I vs V para paneles solares

(Imagen tomada de [\[http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/article/view/3858/6761\]](http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/article/view/3858/6761))

La potencia de la radiación varía durante el día debido a las condiciones atmosféricas y la latitud. En buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiancia.

La corriente que genera el panel aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje casi constante. Siendo muy importante, considerar la posición de los paneles (su orientación e inclinación respecto a la horizontal), ya que la radiación varía a lo largo del día en función de esta inclinación. El aumento de temperatura en las células supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Por ello es importante ubicar los paneles en lugares bien aireados.

Regulador de carga: Administra la energía que llega del panel solar a la batería y también la energía que sale de la batería, previniendo cortocircuitos, sobrecargas y descargas excesivas que acortan la vida útil de la batería. Existen diversos tipos y marcas de reguladores. Se sugiere adquirir siempre uno de buena calidad y adecuado a las condiciones de operación, ojalá tipo serie con desconexión automática por bajo voltaje (LVD) y con indicadores del estado de carga.



Fig 11. Reguladores de carga

(Imagen tomada de [<http://www.amvarworld.com/es/105-reguladores-de-carga-para-panel-solar>])

Baterías eléctricas: Dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía química, que efectúa el proceso inverso durante la descarga.



Fig12. Baterías

(Imagen tomada de [<http://www.amvarworld.com/es/6-baterias>])

Inversores: Son elementos que convierten la corriente DC en AC y viceversa.



Fig 13 Inversores de voltaje

(Imagen tomada de [<http://www.amvarworld.com/es/18-inversores-de-voltaje-dc-ac>])

Los sistemas conectados a la red inyectan excedentes de la energía generada al sistema en momentos de alta demanda y cuando el generador fotovoltaico no produce, la red sostiene a las cargas.

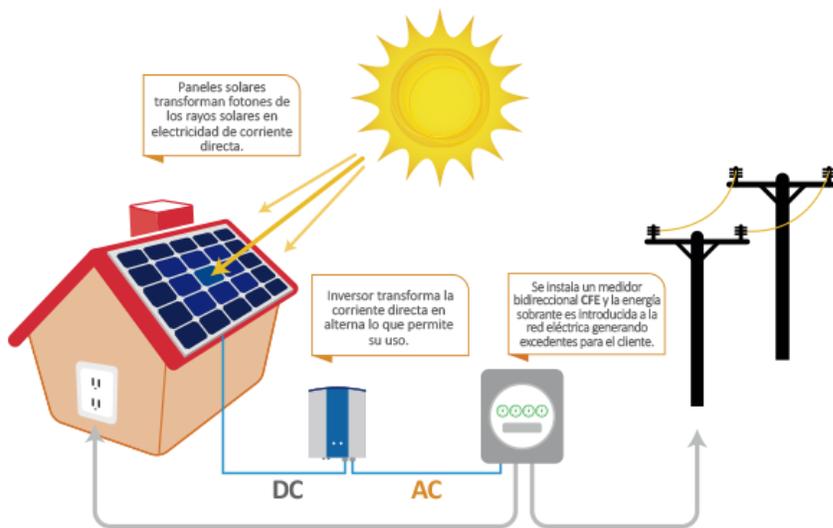


Fig 14. Sistemas Conectados a la red.

(Imagen tomada de [<http://www.enersis.mx/en-tu-domicilio.php>])

2.5. ENERGÍA DE BIOMASA AGRÍCOLA Y FORESTAL



Fig 15. Energía de biomasa

(Imagen tomada de [<http://renovable.com/energia-de-biomasa/>])

Esta emplea residuos vegetales de procesos industriales que han ganado su energía del sol durante su proceso de crecimiento a través de la fotosíntesis, para producir energía eléctrica a partir de vapor generado en calderas. Tal es el caso de generación a partir de la combustión del bagazo de caña y de la palma de cera.

Colombia posee grandes posibilidades en biomasa, basada en cultivos representativos:

Bagazo de Caña: 21000 GWh/año

Cascarilla de Arroz: 10300 GWh/año

Palma Africana: 4700 GWh/año

2.6. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Energía producida a partir del calor que alberga la tierra en su interior, el cual genera vapor que puede ser controlado y llevado a la superficie para hacer girar una turbina y generar energía eléctrica.



Fig 16. Energía Geotérmica

(Imagen tomada de [\[http://www.eltiempo.com/economia/empresas/generacion-de-energia-en-colombia/15267155\]](http://www.eltiempo.com/economia/empresas/generacion-de-energia-en-colombia/15267155))

Este tipo de plantas poseen altos costos en estudios previos, perforaciones e instalación. Sus costos de operación son muy bajos y los impactos ambientales también.

En el país se adelanta un estudio por parte de Isagen en el Nevado del Ruíz para generar 50 MW, con tiempo estimado de 9 años de construcción y 30 de vida útil. Los altos costos de inversión inicial constituyen un desestímulo a este tipo de tecnología.

2.7. SISTEMAS DE ACUMULACION DE ENERGÍA

Para todos los sistemas que involucran energías renovables es muy importante contar con sistemas de acumulación de energía, por cuanto es importante poder almacenar los excedentes producidos. Existen diversas tecnologías con muy variadas características.

Hay sistemas pequeños y grandes, fijos y móviles.

Sus costos de inversión y de mantenimiento son determinantes a la hora de decidir.

Acorde con sus aplicaciones dentro del sistema, se pueden clasificar en:

Sistemas de mejora de calidad de la señal: Operan en tiempos muy reducidos y estabilizan la señal entregada.

Sistemas de transferencia de potencia: Funcionan en intervalos de segundos a minutos y garantizan la continuidad del servicio cuando se debe conmutar la fuente de generación.

Sistemas de gestión de la energía: Se emplean para desacoplar generación y consumo de energía.

Los sistemas de mayor capacidad de almacenamiento y respuesta permiten control de frecuencia y voltaje de la red.

La mejora en los sistemas de almacenamiento hace posible el incremento en la incorporación de sistemas de energías renovables para mejorar la confiabilidad del sistema interconectado y reducir costos de producción de energía al limitar el uso de grandes generadores en momentos de máxima demanda, optimizando la planificación de los sistemas de generación; y disminuyendo las pérdidas por transmisión, por estar cercanos a las fuentes de generación y consumo.

Para diseñar o seleccionar un sistema de almacenamiento, se deben considerar aspectos como:

- Capacidad de almacenamiento adecuada
- Potencia aportada
- Respuesta rápida, controlada y modulada
- Vida útil suficiente al periodo de amortización
- Costos de mantenimiento
- Reducido impacto ambiental

2.7.1. CENTRALES DE BOMBEO

Se emplean en centrales hidroeléctricas para aprovechar los sobrantes de energía generada cuando la demanda es baja. Con esta energía sobrante se activan estaciones de bombeo para llevar el agua de un depósito inferior a uno superior. Cuando la demanda se eleva, con esta agua del depósito superior se activan las turbinas para generar la energía requerida.

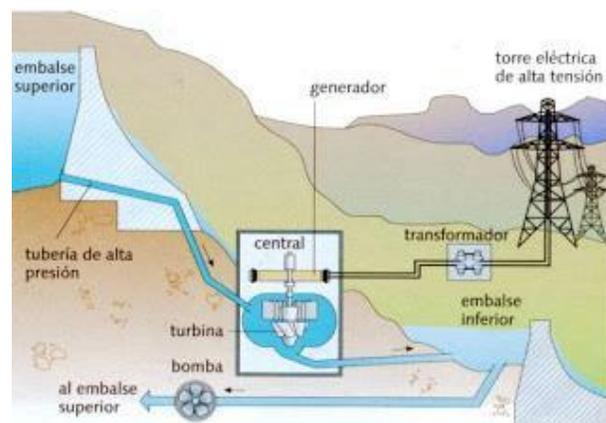


Fig 17 Centrales de Bombeo

(Figura tomada de [<http://janet95.blogspot.com.co/2010/06/central-hidraulica.html>])

Estas centrales tienen una eficiencia hasta del 80% y tienen un momento álgido en este momento en países desarrollados. Se estima que al 2020 se construyan más de 100 nuevas, con una capacidad de 74 GW.

2.7.2 BATERÍAS

En los sistemas aislados de la red, se emplean baterías o arreglos de ellas (bancos) para almacenar el excedente de energía generada.

Una batería contiene placas positivas y negativas y un material separador entre ellas para prevenir un corto circuito. Estos acumuladores transforman la energía química generada en

reacciones electroquímicas en energía eléctrica y viceversa, sin emisiones contaminantes, ni ruidos, con bajo nivel de mantenimiento.

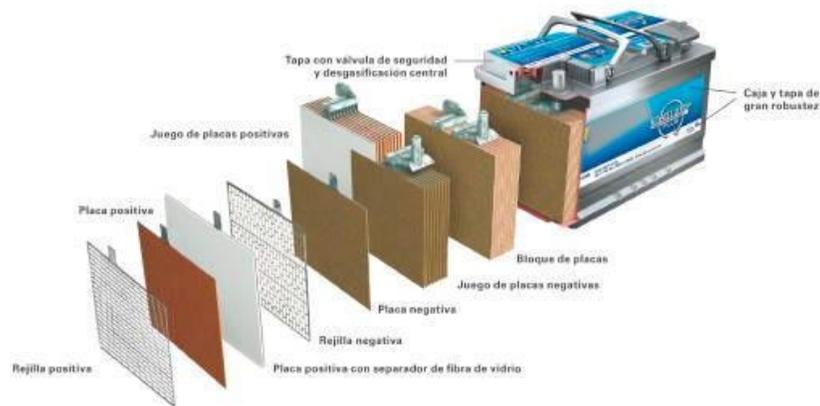


Fig 18. Batería y sus componentes

(Imagen tomada de [: <http://www.rigarmotor.com/servicios/bater%C3%ADas-ecol%C3%B3gicas/>])

Este sistema es uno de los más utilizados, a pesar de la baja eficiencia energética y una vida útil restringida.

Se tienen diferentes tipos de baterías:

- Plomo – ácido
- Metal – aire
- Sodio – Azufre
- Redox Vanadio (VRB)
- Ion litio
- Zinc – Bromuro (ZnBr)

2.7.2.1 Plomo- Acido

Son los más usados con sistemas de energía solar y eólica por su bajo costo. Muy parecidos a las baterías de autos, optimizadas para la nueva aplicación.

Son robustas, pesadas, tienen baja densidad de energía, soportan pocos ciclos de carga y descarga, corta vida útil y afectan al ambiente en su disposición final.

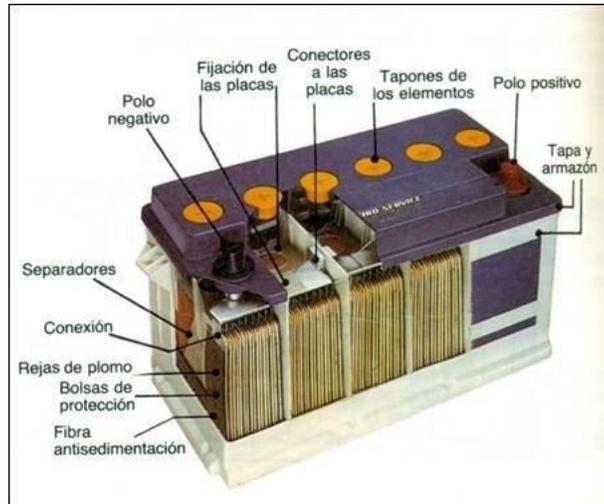


Fig 19 Batería Plomo-Acido

(Imagen tomada de [<http://triplenlace.com/2015/04/09/batera-o-acumulador-de-plomo-voltaje-inmediato/>])

2.7.2.2 Metal – Aire

Son las más compactas y las menos caras. Su densidad energética es alta, pero su recarga es muy ineficiente (50%) y difícil. Poseen ánodos con metales comunes como Aluminio o Zinc que generan electrones cuando se oxidan.

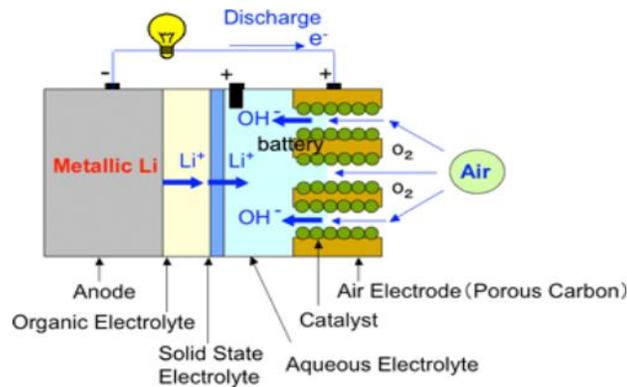


Fig 20 Batería Metal-aire

(Imagen tomada de [<http://cienciadefrontera.blogspot.com.co/2011/12/grafeno-y-baterias-de-litio-aire.html>])

2.7.2.3 Sodio – Azufre (Na – S)

Almacenan la energía disociando químicamente el polisulfuro de sodio, en sodio y azufre. Tienen una mayor densidad energética y pueden durar muchos ciclos de carga-descarga. Su principal inconveniente es que el Sodio y el Azufre deben mantenerse en depósitos separados, en estado fundido a 300°C, lo que las hace demasiado costosas (USD\$3000/kW), frente a otras tecnologías (USD\$1000/kW); además sufren daños irreparables si se descargan completamente y se enfrían.

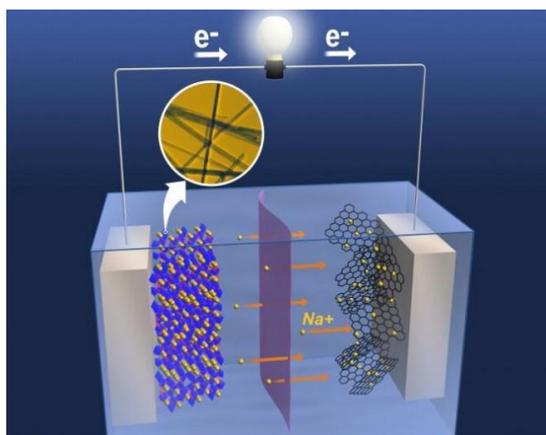


Fig. 21. Batería Sodio-Azufre

(Imagen tomada de [<http://noticiasdelaciencia.com/not/1931/avance-decisivo-en-la-bateria-de-iones-de-sodio-recargable/>])

2.7.2.4 Redox Vanadio

Una batería de flujo es una batería recargable en la que el electrolito que contiene una o más especies electroactivas, fluye a través de la celda electroquímica que convierte la energía química en electricidad.

Se puede almacenar más electrolitos en tanques externos y se bombea dentro de los stacks de celdas.

Estas baterías se recargan rápidamente sustituyendo el electrolito o revirtiendo la solución redox. Así, su capacidad energética está determinada por el tamaño de los tanques y la potencia, por el tamaño del stack.



Fig 22. Batería redox Vanadio

(Imagen tomada de [<http://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf>])

Hay dos tipos de baterías de flujo comerciales: las de Vanadio (VRB) y las de Zinc-Bromo (Zn-Br).

Las que nos ocupan emplean pares redox de Vanadio disueltos en mezclas diluidas de ácido sulfúrico, eliminando el problema de la contaminación por difusión de iones de un lado de la membrana al otro, lo que hace que la vida útil del electrolito sea prácticamente infinita. Tienen una gran rapidez de respuesta de carga/descarga, en un milisegundo pueden proporcionar altas potencias y más de dos veces su potencia nominal en cortos periodos de tiempo hasta varios minutos.

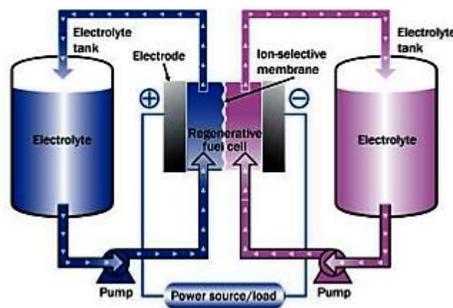


Fig 23 Esquema de funcionamiento batería Redox Vanadio

(Imagen tomada de [<http://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf>])

No existen condiciones especiales durante la carga porque el electrolito se suministra a cada semicelda desde el mismo tanque. Además, el manejo es muy seguro porque la temperatura de operación es la ambiente. Su eficiencia es elevada, del orden del 85%. Dado que la reacción durante la carga es la misma que durante la descarga, la relación carga/descarga es 1:1.

Dentro de sus principales desventajas se encuentra la baja densidad de energía por volumen y la complejidad del sistema en comparación con las baterías tradicionales. El tener que circular grandes volúmenes de electrolitos con bombas limita su aplicación; además sus sistemas de control y eléctrico son complejos y costosos. Sin embargo son muy recomendadas para grandes almacenamientos de energía, en el suavizado del perfil de generación de sistemas variables como el eólico o solar, o para complementar a los generadores ante aumentos repentinos de demanda. También son especialmente adecuadas como UPS, pudiendo desplazar a las baterías de plomo o a los generadores diesel.

2.7.2.5 Ion Litio

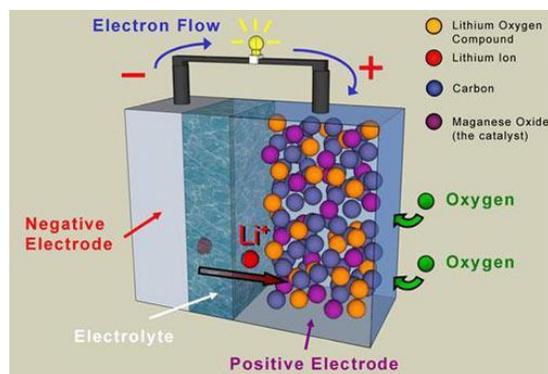


Fig 24 Batería Ion Litio

(Imagen tomada de [<http://www.flow-grid.com/es/bateria-flujo-que-es.php>])

Es una de las que más ventajas presenta para el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento, por su densidad de energía, potencia específica y eficiencia en el almacenamiento, con un 94%, mayor rendimiento en la descarga.

Su alto costo por kWh de alrededor de \$300.000, desestimula su uso.

Las nuevas baterías Ion – litio pueden reemplazar a las baterías de ácido, disponen de bornes totalmente aislados, permiten su conexión en serie o en paralelo.

2.7.2.6. Zinc – Bromuro (ZnBr)

Es una batería de flujo como la Redox Vanadio, compuesta por un stack o agrupación de celdas, dos tanques que contienen un líquido denominado electrolito (en este caso Bromuro de Zinc), dos circuitos hidráulicos que conectan los tanques de líquidos con el stack, y un sistema que controla el funcionamiento de la batería.

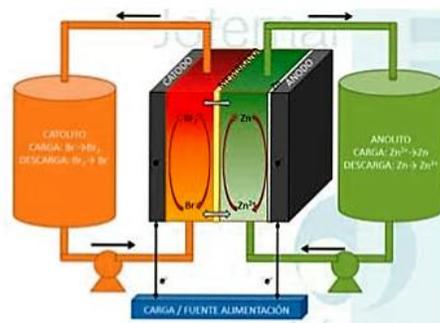


Fig 25 Batería Zinc-Bromuro

(Imagen tomada de <http://www.itespresso.es/baterias-alimentadas-con-oxigeno-mas-ligeras-de-mayor-duracion-79383.html>)

El stack está formado por varias celdas agrupadas en serie o paralelo. Cada celda consta de dos electrodos separados por una membrana que crea dos compartimientos por los que circula el electrolito. Al hacer fluir el líquido a través de las distintas celdas que componen el stack se van a producir en las superficies de los electrodos en contacto con el líquido las reacciones de oxidación-reducción que permiten cargar o descargar la batería. Durante la carga se producirá en uno de los electrodos (cátodo), la formación de Br₂, un gas que es capturado químicamente por un compuesto del electrolito, quedando en disolución y formando una fase líquida de mayor densidad. Por otra parte, en el otro electrodo (ánodo) se produce una reacción de deposición del zinc (Zn) metálico sobre el electrodo. Durante el proceso de descarga, estas reacciones se revierten y el electrolito y los materiales retornan a su estado original, generando una corriente de energía eléctrica al revertir los estados de oxidación a su punto de partida.

2.7.3 VOLANTES DE INERCIA (Flywheels).

El volante de inercia es, básicamente, un sistema de almacenamiento de energía mecánica. Su principal característica frente a otros sistemas es la capacidad de absorber y ceder energía en poco tiempo. Es adecuado para sistemas mecánicos de ciclo energético discontinuo donde el periodo de tiempo sea muy corto, por lo que, tradicionalmente, se ha utilizado en motores y compresores alternativos, prensas y troqueladoras, etc. En volantes tradicionales la cantidad de energía es menor que en otros sistemas de almacenamiento, pero en las últimas décadas se fabrican de materiales compuestos, lo que ha supuesto un aumento notable de su capacidad de almacenamiento. Esta innovación permite aplicarlos a campos en los que antes era totalmente impensable, por ejemplo, para almacenamiento de energía en automóviles, trenes o autobuses, satélites, etc. Con este nuevo tipo de volantes se superan, en algunos aspectos, los sistemas clásicos de almacenamiento de energía. Por ejemplo, si se comparan con las tradicionales baterías químicas, los volantes ofrecen mayor potencia energética, tanto entregada como absorbida. Las baterías, debido a su proceso químico, son muy lentas en el proceso de carga y descarga, y si se pretende disminuir el tiempo su rendimiento desciende a valores del 20 o el 30 %.

Para comparar los acumuladores cinéticos con otros sistemas de almacenamiento se utilizan los conceptos de densidad de energía y de densidad de potencia para expresar la capacidad de almacenar y de intercambiar energía por unidad de masa del acumulador. En la figura 26 se presenta un gráfico comparativo entre los volantes de inercia y algunos sistemas comunes aplicados a vehículos, obtenido de Kulkarni (1982). Se representan en coordenadas de densidad de energía, en $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, y densidad de potencia, en $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$, las regiones de trabajo de los volantes, las baterías químicas, los motores de combustión interna y la célula de combustión.

En la figura 26 se puede notar que la densidad de potencia en los volantes es muy alta en contraste con diferentes clases de baterías químicas y con motores de combustión interna. En cambio, su densidad de energía es parecida a las baterías convencionales y es más baja que las baterías especiales y los motores. Por lo tanto, la principal característica de los volantes es su alta densidad de potencia.

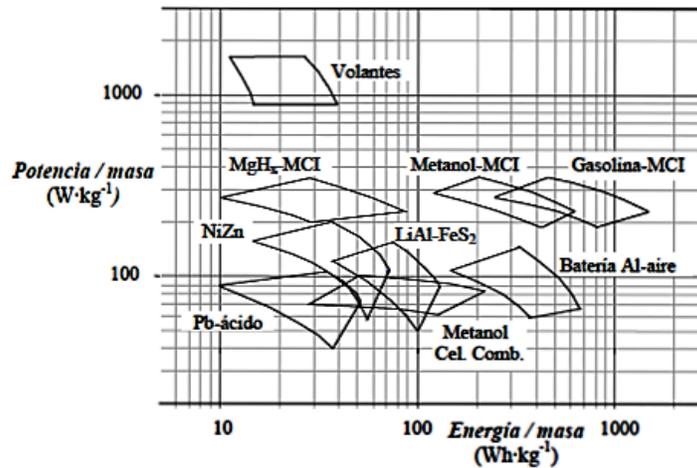


Figura 26: Comparación de la densidad de potencia en función de la densidad de energía entre acumuladores de energía: volantes, motores de combustión interna, baterías y células de combustión, (Kulkarni).

(Imagen tomada de [

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6415/01LLrp01de01.pdf;jsessionid=3E3E564FBA8D43693C49D677A67D807E?sequence=1>])

Estos dos parámetros son muy genéricos y dan una visión global de los sistemas. Si se quiere una comparación completa hay que tener en cuenta otros factores, por ejemplo el número de ciclos de vida, los costos de fabricación y explotación, etc.

En la figura 26 se comparan los volantes con los sistemas más tradicionales pero existen otros sistemas alternativos, menos conocidos. Por ejemplo en Olszewski y otros (1988), se comparan con el almacenamiento neumático y se deduce que la eficiencia y la densidad de energía es más alta en las volantes.

2.7.3.1 Elementos de un acumulador cinético: En las aplicaciones más clásicas los volantes reciben la energía a través de una transmisión mecánica, como si fueran un subconjunto de la máquina. En estos casos es habitual que tengan un multiplicador para aumentar las revoluciones, o incluso un variador para adaptarse a distintos regímenes, como se expone en Jefferson y Ackerman (1996).

Cada vez es más frecuente que el volante incorpore un motor-generator eléctrico propio, de forma que configura una máquina aislada, conectada al exterior únicamente por cables eléctricos igual que una batería eléctrica. Su principal ventaja es la versatilidad porque se

adapta fácilmente a cualquier necesidad energética mediante una adecuada regulación electrónica. Físicamente está formado por cinco elementos básicos, figura 27: (1) el rotor, (2) los cojinetes, (3) el motor-generator, (4) el recipiente de vacío y (5) el sistema de regulación.

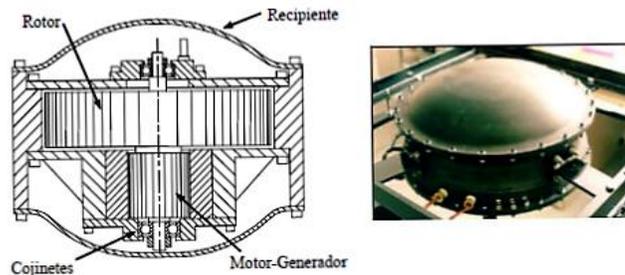


Figura 27: Elementos de un acumulador cinético.

(Imagen tomada de

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6415/01LLrp01de01.pdf;jsessionid=3E3E564FBA8D43693C49D677A67D807E?sequence=1>)

1. El rotor es el elemento central del acumulador, donde se almacena propiamente la energía. Está formado principalmente por la masa cilíndrica y el eje central.
2. Los cojinetes de giro suelen ser simples rodamientos de alta velocidad. En modelos más sofisticados se montan cojinetes de levitación magnética que eliminan las pérdidas por rozamiento.
3. El motor-generator convierte la energía eléctrica en cinética y viceversa. Gira solidario al rotor y puede estar situado en paralelo con el disco, como se muestra en la figura 27, o concéntrico a la masa circular. En este último las bobinas estáticas se sitúan sobre el eje central fijo y las rotóricas en el interior de la masa cilíndrica.
4. El conjunto está encerrado en un recipiente de protección que evita el acceso a los elementos móviles. En algunos casos se efectúa el vacío para eliminar el rozamiento aerodinámico.
5. Además de las partes mecánicas, incorpora un equipo de regulación de la potencia eléctrica que gestiona el flujo de energía con el exterior.

Este tipo de acumuladores, además de ser versátiles, minimizan las pérdidas por fricción y la energía se mantiene durante horas o incluso días. Por contra, tienen pérdidas en la entrada y salida de energía debido al rendimiento eléctrico del motor.

El rotor: En los rotores de la mayoría de aplicaciones actuales los metales de alta resistencia se sustituyen por materiales compuestos ligeros. Su baja densidad está compensada por el aumento de la velocidad de giro y es muy frecuente que su velocidad periférica supere la velocidad del sonido. Hay que tener en cuenta que la densidad del material afecta tanto a la energía cinética como a la tensión del material, porque ambas son función de la masa y del cuadrado de la velocidad. Por lo tanto, un material de alta densidad no es necesariamente mejor para un volante, su energía cinética máxima depende tanto de la masa como de la resistencia.

Para una misma geometría la energía cinética del rotor depende de la tensión admisible y es independiente de la densidad, como se expone en Genta (1985). En efecto, como se observa en la ecuación la energía cinética E_c de un volante es función de la tensión admisible σ , del volumen de material V y de un coeficiente geométrico K .

$$E_c = KV \sigma$$

La energía cinética depende, además del material, de la geometría del rotor. La fuerza centrífuga de una porción de masa se compensa con otra opuesta situada a 180° y el recorrido de la fuerza por el interior del rotor determina los puntos sometidos a tensión. Luego, la configuración geométrica de un rotor depende tanto de la posición de la masa como de las zonas intermedias preparadas para resistir el flujo de fuerzas. En este sentido, los rotores aplicados a volantes de inercia tienen unas determinadas configuraciones que optimizan los resultados. El artículo de Post y Post (1973) hace un resumen de los tipos básicos de rotores y compara sus principales características.

Las configuraciones de los rotores metálicos no son útiles para materiales compuestos, como expone Genta (1985). Por ejemplo, la unión de la llanta con el eje mediante un disco de espesor axial variable, frecuente en los rotores metálicos, es perjudicial para los materiales compuestos. Esta configuración es excesivamente rígida y debe sustituirse por una unión elástica que permita cierta libertad radial a la llanta.

En Post y Post (1973) y Genta (1985) se presentan las configuraciones más típicas para los rotores de materiales compuestos, que se resumen en la figura 28.

Las configuraciones constructivamente más complejas tienen un funcionamiento mecánico más simple. En el modelo (a) el material de los radios es más elástico que en la llanta y permiten la necesaria deformación radial. En los casos (b) y (c) los aros curvados tienen también elasticidad radial. En el (f) la flexión del cubo en forma de z permite simultáneamente el desplazamiento axial y radial. En los casos (d) y (e) el rotor está formado por múltiples anillos, en el primero están unidos por una capa fina de material elastómero que permite un desplazamiento radial entre ellos y en el segundo cada anillo es de un material compuesto distinto, con elasticidad creciente en el interior.

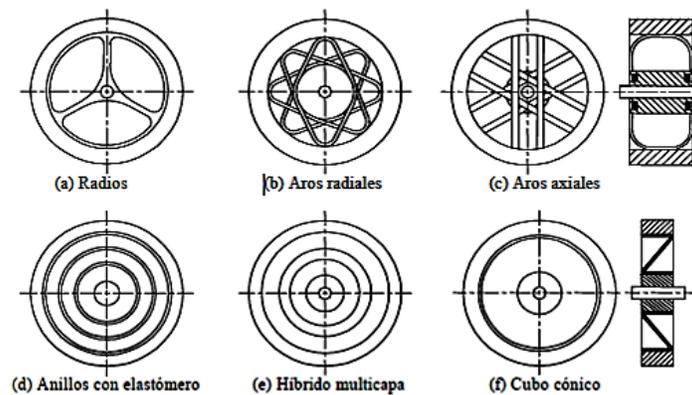


Figura 28: Configuraciones de rotores para volantes y sus uniones con el eje.

(Imagen tomada de

<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6415/01LLrp01de01.pdf;jsessionid=3E3E564FBA8D43693C49D677A67D807E?sequence=1>)

2.7.3.2 Aplicaciones: La aplicación más destacable de los últimos años ha sido para el suministro de energía eléctrica a satélites en la industria aeroespacial. Durante las horas solares se almacena la energía proveniente de las placas fotovoltaicas, de forma similar a las baterías eléctricas pero con menos peso y mayor fiabilidad, Christopher y Beach (1998).

Otro campo es la aplicación a los vehículos urbanos, cuya velocidad es discontinua y la energía cinética se pierde en forma de calor durante las frenadas. El acumulador cinético es capaz de almacenar la energía de la frenada porque su potencia, a diferencia de las baterías químicas,

es suficiente para absorber la energía en unos segundos y para devolverla en la aceleración. Se aplica a automóviles, Álvarez y otros (1998) y a autobuses, Jefferson y Ackerman (1996). En los trenes, tanto urbanos como interurbanos, trabajan igual que en los vehículos urbanos y se aplican tanto si el motor es eléctrico como de combustión interna, Herbst y otros (1998). De forma similar, aunque para menos energía, se aplica a los tranvías urbanos, Jefferson y Ackerman (1996). En cambio, en los trenes de alta velocidad es distinto, el acumulador debe estar situado en las estaciones porque su masa es muy grande comparada con la masa del tren.

Existen otras aplicaciones, por ejemplo en las redes de suministro de energía eléctrica para evitar los cortes de corriente, Koch (1997). Se utilizan como fuente complementaria durante las interrupciones de corta duración, con periodos de tiempo entre 10 y 60 segundos, según Darrelman (1999).

Como principales ventajas se destacan:

- Poca exigencia en mantenimiento.
- Larga vida útil
- Comportamiento inerte frente a condiciones medioambientales.
- Eficiencias mayores al 80%.
- Paso de 0% - 100% de potencia entregada en un tiempo menor a 5 ms.

2.7.4 BOBINAS ELECTROMAGNÉTICAS SUPERCONDUCTORAS O SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE (SMES).

Utilizado a pequeña escala, en el ámbito residencial. Ofrece una eficiencia energética cercana al 100% y un ciclo casi ilimitado. Permite almacenar energía en un campo magnético por la circulación de una corriente DC a través de un anillo superconductor refrigerado a una temperatura especial criogénica.

2.7.5 AIRE COMPRIMIDO (CAES)

Durante las horas de baja demanda se bombea aire dentro de unas cuevas subterráneas creando alta presión. Luego se aprovecha esta presión en los periodos de mayor demanda de energía para hacer girar unas turbinas, generando electricidad. Es un sistema eficiente, limpio

y económico. Constan de un sistema de almacenamiento de aire y de una turbina que genera electricidad a partir del aire comprimido.

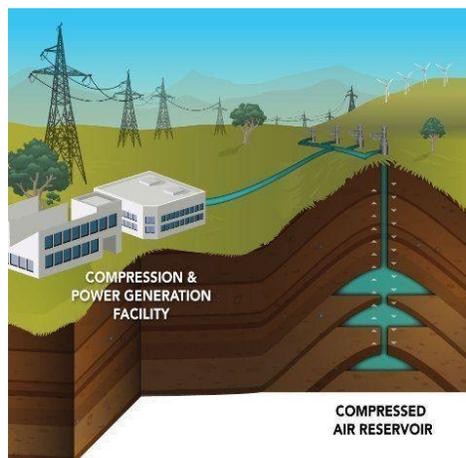


Fig 29 Acumulación por aire comprimido

(Imagen tomada de [<http://www.ecointeligencia.com/2013/07/almacenar-energia-comprimiendo-aire/>]).

Este tipo de sistemas posee un rendimiento alrededor del 70%. Actualmente se adelantan proyectos en Alemania (Huntorf) y Estados Unidos (McIntosh, Iowa Storage Energy Park).

Dentro de sus limitantes se encuentran:

- Tiempo de respuesta tardío.
- Problemas de fugas y fricción debido a la naturaleza gaseosa del aire.
- Relaciones bajas de eficiencia.

En la actualidad se están desarrollando sistemas hidroneumáticos, mucho más eficientes y menos robustos, que al unirse con los supercondensadores mejoran los tiempos de respuesta. Todo direccionado hacia el servicio residencial para unificarlo con la energía eólica.

2.7.6 SUPERCONDENSADORES

El almacenamiento de energía en supercondensadores se realiza en forma de campo eléctrico entre dos electrodos. Tiene el mismo principio que los condensadores excepto por el material aislante, el cual es reemplazado por un electrolito conductor. La energía obtenida es alta, aproximadamente 15 Wh/Kg.



Fig 30. Supercondensadores

(Imagen tomada de [<http://cochesecho.com/supercondensadores-la-proxima-evolucion-de-los-coches-hibridos/supercondensadores/>]).

Entre sus principales características se encuentran:

- Altas capacidades de almacenamiento: 1- 5000 F
- Densidad de energía: 1- 10 Wh/Kg
- Densidad de potencia: 1 – 10 kW/Kg
- Tiempos de carga/descarga: minutos, segundos.
- Número de ciclos de carga/descarga: 10^6
- Tensión de trabajo: 1-500V
- Rendimiento Eléctrico: 95-99%
- Muy baja auto-descarga
- Precio relativamente alto
- No requieren mantenimiento
- No poseen elementos tóxicos
- Resistencia a condiciones adversas de temperatura

Las que los hacen muy aptos para la integración de energías alternativas en diferentes ámbitos.

CAPÍTULO 3. REGULACIÓN VIGENTE EN COLOMBIA

En nuestro país se han realizado importantes esfuerzos desde el punto de vista regulatorio para fomentar la aplicación de energías alternativas sobre todo en las zonas no interconectadas y su integración en el sistema energético nacional.

Se ha recorrido un largo camino:

Desde el año 1994 cuando se definieron los autogeneradores en la ley 143, los cuales fueron redefinidos en la Resolución CREG 084 DE 1996, para dar acceso a las personas naturales.

La ley 142 de 1994 define a los Cogeneradores, modificados mediante la resolución CREG 107 de 1998 y la ley 1215 de 2008 que eliminó el pago del 20% de contribución a los cogeneradores sobre la energía generada y consumida.

La ley 788 de 2002 consagró exención de renta por venta de energía proveniente de biomasa, estimuló este tipo de esfuerzos. La resolución CREG 005 de 2010 reglamenta nuevamente y diferencia a los cogeneradores, brindándoles estímulos y condiciones especiales para su desarrollo.

La Resolución 180919 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía adoptó el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no convencionales (FNCE) PROURE.

El proyecto de ley 09 de 2012 sobre promoción e incentivo en el uso de paneles solares y paneles fotovoltaicos.

La NTC 5412 de Septiembre de 2013 sobre características de calidad de la potencia de Aerogeneradores conectados a la red.

Uno de los mayores esfuerzos es la Ley 1715 del 13 de Mayo de 2014, que cursó un gran trámite desde su introducción el 15 de Agosto de 2012, luego fue aprobada en la Cámara de Representantes el 18 de Junio de 2013; se tramitó su aprobación en el Senado el 9 de Diciembre de 2013, con objeción Presidencial el 14 de Enero de 2014; enmendada el 8 de Abril de 2014 y aprobada por fin el 13 de Mayo de 2014. Actualmente se encuentra en etapa de Reglamentación para su efectiva aplicación, la cual ha avanzado así:

Decreto 2469 de 2014: Lineamientos para la entrega de excedentes de energía por parte de autogeneradores a gran escala.

Resolución CREG 175 de 2014 para reglamentar la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN).

Resolución CREG 024 DE 2015 por la cual se regula la actividad de autogeneración en el sistema interconectado nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones.

Decreto 2492 de 2014: Lineamientos a mecanismos de respuesta de la demanda.

Resolución CREG 098 de 2015 para regular la respuesta de la demanda para el mercado diario en condiciones de escasez.

Proyecto de decreto de incentivos, publicado para comentarios el 16 de abril de 2015.

Proyecto de decreto ZNI publicado para comentarios el 16 de abril de 2015.

Proyecto de decreto FENOGE **Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía**, publicado para comentarios el 20 de mayo de 2015.

Resolución UPME 281 de 2015, definición de límite máximo de potencia de autogeneración a pequeña escala (1MW), del 05 de junio de 2015.

Decreto 1623 de 2015, lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el SIN y en las ZNI, expedido el 11 de julio de 2015.

Resolución UPME 045 de 03 febrero de 2016 Procedimiento exclusión IVA y exención arancel – Ley 1715 de 2014.

Resolución 1283 MADS Agosto 3 de 2016: Certificación Beneficio Ambiental de FNCER y EE-Ley 1715 de 2014.

Resolución 1312 MADS 11 Agosto 2016: Estudio Impacto Ambiental Energía Eólica.

Pendientes: Reglamentación de autogeneración a pequeña escala, generación distribuida, eficiencia energética. Se espera que esté en aplicación para mediados del año 2016.

3.1 REGULACIÓN EN OTROS PAÍSES

3.1.1 MÉXICO.

México le ha apostado al Net-Metering desde el año 2007 cuando dio acceso a los pequeños generadores domésticos, hasta 10 kW a niveles de tensión inferiores a 1 kV con sistemas solares fotovoltaicos para funcionar en doble vía con el sistema interconectado nacional. Las diferencias positivas de generación se guardan hasta por 12 meses, para ser cruzadas con las empresas generadoras; de lo contrario se pierden, pues no se pagan en efectivo.

Ya en 2010 se abrieron las puertas para generadores medianos e industriales que incluían otras fuentes de generación, como las minieólicas y la biomasa, las mini-hidráulicas, entre otras; y con capacidad para generar hasta 500 kW con niveles de tensión entre 1 kV y 69 kV. En el 2012 se permitió el acceso a medianos generadores comunitarios, como los logrados en conjuntos de apartamentos o en centros comerciales, hasta 30 kW a niveles de tensión inferiores a 1 kV.

3.1.2 CHILE

Chile también ha adoptado reglamentaciones en el sentido de lograr que los usuarios puedan ser autogeneradores, en algo conocido como NET METERING. Recientemente aprobó la ley 20571 con la cual se permite que auto-generadores hasta 100 kW puedan vender excedentes de energías generadas con Energías no convencionales como la solar o la eólica, instalando medidores de doble vía. Los excedentes a favor del usuario deberán ser pagados por la compañía eléctrica en efectivo.

3.1.3 ECUADOR

Cuenta con una resolución que definió tarifas de reconocimiento para renovables desde 2002, con modificaciones en 2006, 2009 y 2012. No se ha logrado su implementación efectiva.

3.1.4 ARGENTINA

Se introdujo el pago Premium para energías renovables en 2006 por la ley 26: *Régimen de fomento para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica*. Sobre todo se aplicó a Solar Fotovoltaica (0.18 USD\$/kWh). No se financiaron proyectos por falta de reglamentación e incertidumbre.

3.1.5 REPÚBLICA DOMINICANA

La ley 57-07 de *Incentivos a las Energías Renovables y Regímenes Especiales* estableció valores de retribución a la generación con energías renovables. Para sistemas menores a 25 kW otorgaban hasta 0.53 US\$/kWh. Actualmente existe proceso para solicitar concesión y firma de PPAs. (Power Purchase Agreement).

3.1.6 COSTA RICA

Proyecto Piloto del ICE (Instituto Costarricense de Electricidad) desde 2010: *Plan Piloto de Generación Distribuida para Autoconsumo*, programa experimental diseñado por el ICE y cuyo fin es motivar a sus clientes en la instalación de pequeños sistemas de generación distribuida basados en fuentes renovables. Dentro de sus desventajas se encuentra que no es implementado por todas las distribuidoras y que sólo es un plan piloto por el momento.

3.1.7 URUGUAY

Primer país en adoptar la medición neta en Latinoamérica mediante el Decreto 173/2010. Definió ventanilla única para trámites, publicación y divulgación, agilidad en conexión; se añaden beneficios como exoneración de tasas, devolución del IVA, exoneración de impuestos.

CAPÍTULO 4. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN MICRO-REDES

4.1 CANADÁ

En la *BC Hydro Canadá-Boston Bar* se interconecta una subestación 69/25 kV compuesta por tres alimentadores radiales. Fue construida como solución frente a continuos apagones. Posee dos generadores hidráulicos de 8,75 MVA. No cuenta con dispositivos de almacenamiento.

Hydro Quebec-Boralex planned islanding construida para alimentar 3000 consumidores, conectada a 120 kV con una línea de transmisión de 40 km. Posee un generador de vapor con demanda pico de 7 MW. No posee sistemas de comunicaciones ni de almacenamiento.

4.2 ESTADOS UNIDOS

Cerca de Columbus, Ohio se construyó *CERTS testbed*. Posee generadores basados en convertidores estáticos (inversores) de 60 kW potenciados por gas natural. Tiene sistema de comunicaciones con operador de red.

En la Universidad de Wisconsin se encuentra la *UW MICROGRID* para estudio de generadores operados con diesel. Posee sistema de almacenamiento basado en inversores.

4.3 HOLANDA

Se tiene uno de los proyectos más ambiciosos de la Unión Europea: *Bronsbergen Holiday Park microgrid* basado en generación solar, alimenta 208 hogares, con generación pico de 315 MW. Está conectada a la red de media tensión (10 kV) mediante un transformador de 400 kVA. Posee central de almacenamiento mediante baterías e incluye control central y comunicación con la central de despacho, además sistema automatizado para funcionar como isla o conectado a la red.

4.4 ALEMANIA

Se tiene *The Residential Microgrid of Am Steinweg in Strutensee* conectada a baja tensión (400V) generando a partir de una planta térmica (CHP) de 28 kW, una central fotovoltaica con generación pico de 35W y un banco de baterías conectado mediante inversor bidireccional de 100 kW para alimentar 101 apartamentos. Posee dispositivos de medida y

control para enviar datos al operador del sistema de distribución y autorizar su operación en modo isla.

DeMoTec test microgrid system consiste de generadores diesel, generador fotovoltaico, generador eólico con almacenamiento mediante bancos de baterías con capacidad total de 200 kW. Se controla mediante SCADA y posee cargas controlables con distintos niveles de prioridad.

4.5 REINO UNIDO

En la Universidad de Manchester aparece *University of Manchester microgrid/flywheel energy storage laboratory prototype*. Posee un generador sincrónico y un motor de inducción acoplados, y un flywheel conectado mediante inversor como sistema de almacenamiento y para mantener los niveles de tensión y frecuencia cuando se opera en modo aislado.

4.6 JAPÓN

Se tiene un proyecto de demostración *Aichi microgrid Project-Central Japan airport city*. Combina celdas de combustible con un sistema fotovoltaico y sistema de almacenamiento a base de baterías para aportar 1150 kW. Se tiene algoritmo de optimización para la planeación diaria y el despacho.

Kyoto eco-energy Project (Kyotango Project) es una micro-red virtual que permite hacer estudios para generar estrategias de comunicación y control con diversas tecnologías.

Pais	MG	GD	Almacenamiento	Cargas
Canadá	BC Hydro Canada – Boston Bar	Hidráulica	-	Residenciales
	Hydro Quebec – Boralex planned islanding	Diesel	-	Residenciales
Estados Unidos	CERTS testbed	Gas	Baterías	Estáticas
	UW microgrid	Gas - PV	-	Estáticas
Holanda	Bronbergen Holiday Park microgrid	PV	Baterías	Residenciales
Alemania	The Residential Microgrid of Am Steimweg in Strumensee	CHP - PV	Baterías	Residenciales
	DeMoTec test microgrid system	PV - Eólica - Diesel	Baterías	Residenciales y Comerciales
Reino Unido	University of Manchester microgrid/flywheel energy storage laboratory prototype	Generador y Motor	Flywheel	Estáticas
Japón	Aichi microgrid Project – Central Japan airport city	PV - Celdas de combustible	Baterías	Industriales y Comerciales
	Kyoto eco-energy Project (Kyotango project)	PV - Eólica - Celdas de combustible - Diesel	Baterías	Residenciales

Tabla 2. Proyectos de MR a nivel mundial (Imagen tomada de [[microredes unal.pdf](#)])

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- ✓ Según la descripción de las tecnologías asociadas a las micro-redes, se observa que en Colombia por su diversidad geográfica existe amplio panorama para el desarrollo de energías alternativas como la solar fotovoltaica y la eólica.
- ✓ En cuanto a la regulación, se encontraron varios esfuerzos importantes, faltando implementaciones que hagan atractivas las inversiones a gran escala en fuentes no convencionales de energía.
- ✓ Comparado con el contexto mundial, Colombia apenas está incursionando incipientemente en el mundo de las Micro-redes.
- ✓ A nivel de Latinoamérica ya hay experiencias cercanas más adelantadas como las de Chile y México que sirven de base para que en Colombia se pueda avanzar de mejor manera en este sentido.
- ✓ A medida que la regulación permita que se sumen cada vez más pequeños generadores con fuentes no convencionales, y que haya reglas claras del negocio, con beneficios tributarios, se espera que los precios de los insumos se vuelvan atractivos y competitivos para el ingreso de grandes agentes a este mercado

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Lopes JAP, Hatziargyriou N, Mutale J, Djapic P, Jenkins N, Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers. Challenges, and opportunities. *Electr Power Syst Res* 2007, 77:1189-1203.
- ✓ <http://www.creg.gov.co/>
- ✓ <http://www.upme.gov.co/>
- ✓ Ackermann T, Andersson g, Soder L, Distributed generation: a definition. *Electr Power Syst Res* 2001, 57:195-204.
- ✓ Costa PM, Matos MA. Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks. *Electr Power Syst Res* 2009, 79:382-389.
- ✓ Ley 1715 de 2014. wsp.presidencia.gov.co/.../Leyes/.../LEY%201715%20DEL%2013%20D...
- ✓ Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, Dimeas A. Microgrids management. *IEEE Power Energy Mag* 2008, 6:54-65.
- ✓ Pudjianto D, Strbac G, van Oberbeeke F, Androutsos AI, Larrabe Z, Saraiva JT. Investigation of regulatory, commercial, economic and environmental issues in microgrids. In: *International Conference on Future Power Systems*. Amsterdam, The Netherlands; 2005.
- ✓ Pudjianto D, Ramsay C, Strbac G. Microgrids and virtual power plants: concepts to support the integration of distributed energy resources. *J Power Energy* 2008, 222:731-741.
- ✓ Costa PM, Matos MA, Lopez JAP. Regulation of microgeneration and microgrids. *Energy Policy* 2008, 36:3893-3904.
- ✓ Ministry of Economy and Innovation (MEI) Decree-Law 363/2007 (in Portuguese). Available at: <http://dre.pt/pdf1s/2007/11/21100/0797807984.pdf>.
- ✓ Beidou F Bagnan y otros. Smart Grid: Challenges, research directions. 2010, *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pags 670-673.