

SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-SOLAR Y EÓLICO-DIESEL (ES/ED)

**CARLOS ANDRÉS GÓMEZ ARBOLEDA
HELENA PATRICIA MORA MADRIGAL**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2009**

SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-SOLAR Y EÓLICO-DIESEL (ES/ED)

CARLOS ANDRÉS GÓMEZ ARBOLEDA

HELENA PATRICIA MORA MADRIGAL

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero(a) Electricista

Director

IDI AMÍN ISAAC MILLÁN

Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2009

Nota de aceptación

Firma

Nombre

Presidente del jurado

Firma

Nombre

Jurado

Firma

Nombre

Jurado

Medellín, 29 de Octubre de 2009

A nuestros padres y hermanos...

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, queremos agradecer a Dios por habernos dado la seguridad y fortacelernos desde la realización y culminación de este primer paso en la formación como profesionales.

De manera muy especial a nuestra familia por el apoyo incondicional, por la paciencia, y su amor en todo momento en el proceso de nuestra formacion.

También queremos agradecer de manera muy sincera a nuestro director el Ingeniero Idi Amín Isaac Millán por su apoyo, por el tiempo dedicado, la asesoría prestada para llevar a cabo al realización de este trabajo de grado y por confiar en nuestras aptitudes.

A todos los que hicieron parte de este recorrido...

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	30
1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	33
1.1 IMPORTANCIA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	36
1.2 ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA	38
1.3 MARCO LEGAL.....	41
1.3.1 Protocolo de kioto	41
2. ENERGÍA EÓLICA.....	44
2.1 HISTORIA DE LA ENERGÍA EÓLICA	44
2.2 EÓLICA A NIVEL MUNDIAL.....	48
2.3 TENDENCIAS DE LA ENERGÍA EÓLICA.....	52
2.4 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	53
2.5 CARACTERISTICAS DE PEQUEÑOS Y MICRO AEROGENERADORES	56
2.6 VELOCIDADES Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DEL VIENTO.....	59
2.7 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LOS AEROGENERADORES.....	61
2.7.1 Descripción de las diferentes topologías de los aerogeneradores.....	62
2.7.1.1 Aerogeneradores de velocidad fija.....	62

2.7.1.2	Aerogeneradores de Velocidad Variable.....	63
2.7.2	Descripción de los conceptos de control de potencia en los aerogeneradores.....	64
2.7.3	Estado de arte de los generadores	66
3.	ENERGÍA SOLAR.....	69
3.1	SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA SOLAR	70
3.2	ENERGÍA SOLAR FV	72
3.3	POTENCIAL DE LA ENERGÍA FV EN EL MUNDO.....	76
3.3.1	Centrales de energia solar fv	79
3.4	POTENCIAL DE LA ENERGÍA FV EN COLOMBIA	81
3.5	TECNOLOGIA DE LAS CELDAS FV.....	85
3.5.1	Silicio monocristalino.....	86
3.5.2	Silicio policristalino y semicristalino.....	87
3.5.3	Lámina delgada	88
3.5.4	Silicio amorfo	89
3.5.5	Celdas esféricas.....	90
3.5.6	Celdas concentradas	91
3.6	ASPECTOS MEDIOMBIENTALES.....	94
4.	GENERADORES DIESEL	96

4.1	CATEGORÍA DE EMPLEO DE LOS GENERADORES DIESEL	98
4.2	APLICACIONES DE LOS GENERADORES DIESEL.....	99
4.2.1	Aplicación como fuente primaria	99
4.2.2	Aplicación como fuente auxiliar.....	101
4.3	COMPONENTES BÁSICOS DE UN GENERADOR DIESEL.....	102
4.3.1	El motor diesel	103
4.3.1.1	Características del motor diesel.....	104
4.3.2	Características del generador	105
4.3.2.1	Características del generador en vacío, cortocircuito y en carga.....	105
4.4	LA TEMPERATURA AMBIENTE EN EL SITIO DE LA INSTALACIÓN DEL GRUPO ELECTRÓGENO.....	109
5.	SISTEMAS HÍBRIDOS.....	112
5.1	USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN SISTEMAS AISLADOS	112
5.1.1	Configuraciones y conceptos de los sistemas híbridos.....	114
5.1.1.1	Sistemas híbridos aislados en CD	115
5.1.1.2	Sistemas híbridos aislados en CA	116
5.2	SISTEMA EÓLICO-DIESEL	118
5.2.1	Consideraciones y limitaciones básicas para centrales eólico-diesel ...	119

5.2.1.1	Penetración de la energía eólica.....	121
5.2.1.2	Balance de potencia.....	122
5.2.1.3	Sistema básico de operación y control.....	124
5.2.1.4	Economía del sistema básico	125
5.2.1.5	Función del almacenamiento en sistemas E-D	126
5.3	SISTEMA EÓLICO-SOLAR (E-S).....	128
5.3.1	Componentes del sistema.....	129
5.3.2	Sistemas e-s conectados a la red	130
5.3.3	Sistemas e-s aislados	131
5.4	PROYECTOS CON SISTEMAS HÍBRIDOS ED-ES.....	132
5.4.1	Ejemplos de proyectos ED-ES en Colombia.....	132
5.4.2	Proyectos con sistemas híbridos a nivel mundial.....	134
6.	SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO E-D.....	136
6.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA E-D.....	138
6.1.1	Turbina eólica	138
6.1.2	Generador de inducción.....	139
6.1.3	Motor diesel	140
6.1.4	Generador sincrónico acoplado al motor diesel	141
6.1.5	Carga fija.....	142
6.2	ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA E-D	142

CONCLUSIONES	152
TRABAJOS FUTUROS	156
BIBLIOGRAFIA	158
ANEXOS	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones Mundiales de CO ₂	34
Figura 2. Emisiones Mundiales de CO ₂ por países	35
Figura 3. Capacidad instalada (%) de los países potencias en energía eólica en 2008	50
Figura 4. Potencia instalada acumulada a nivel mundial. 1996-2008.....	51
Figura 5. Compañías líderes en el mundo de energía eólica.	52
Figura 6. Partes de un Aerogenerador.	54
Figura 7. Configuraciones típicas de los aerogeneradores	67
Figura 8 . Elementos de un Sistema FV básico.....	75
Figura 9. Capacidad FV acumulada mundial.....	78
Figura 10. Esquema básico de una central FV.....	79
Figura 11. Imagen real de la central FV más grande del mundo. Ubicada en Portugal.....	80
Figura 12. Distribución espacial de la Radiación Global en Colombia, promedio multianual.....	84
Figura 13. Elaboración del lingote monocristalino	87
Figura 14. Celdas solares con forma esférica	91
Figura 15. Lente concentrando la luz solar sobre una pequeña área.....	92

Figura 16. Principales fabricantes de celdas solares en el mundo.....	94
Figura 17. Partes de un generador diesel	103
Figura 18. Curvas características en vacío y cortocircuito de un generador sincrónico	106
Figura 19. Variación de la tensión en bornes de salida de un generador autoexcitado con la corriente de carga (para carga R / R-L).....	107
Figura 20. a) Comportamiento del generador de una planta diesel ante variaciones de la corriente de excitación (velocidad constante). b) Variación de la tensión de salida de un generador con la corriente para diferentes tipos de carga.	108
Figura 21. (a) Curva típica de disminución de potencia por elevación de la temperatura ambiente para un generador diesel. (b) Curva típica de disminución de potencia por cambio de altura sobre el nivel del mar para un grupo electrógeno.....	110
Figura 22. Sistema híbrido de CD	115
Figura 23. Sistema híbrido de CA	117
Figura 24. Sistema típico Eólico-Diesel de gran potencia	118
Figura 25. Balance de energía de un sistema E-D.....	123
Figura 26. Consumo de combustible de un generador diesel.	128
Figura 27 . Sistema E-S conectado a la red eléctrica.....	131
Figura 28. Sistema E-S autónomo para alimentación de cargas de CD.	132
Figura 29. Sistema Híbrido E-D aislado.	137

Figura 30. Simulación en PSCAD del Sistema híbrido E-D.....	144
Figura 31. Respuesta del sistema E-D ante una velocidad de viento constante.	146
Figura 32. Respuesta del sistema E-D ante cambios de la velocidad de viento	148
Figura 33. Respuesta del sistema E-D ante una ráfaga de viento	150
Figura C1. Esquema de almacenamiento por aire comprimido.....	176
Figura C2. Esquema de un sistema eléctrico con volante de inercia	177
Figura C3. Esquema de funcionamiento de una batería	178
Figura C4. Tipos de superconductores	180
Figura D1. Esquema de instalación aislada	184
Figura D2. Esquema de conexión de una vivienda unifamiliar	185
Figura E1. SPT de un parque eólico	188
Figura E2. Sistema de apantallamiento de los alabes de un aerogenerador	193

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Energías alternativas disponibles en Colombia en 2006.....	40
Tabla 2. Historia de las Turbinas Eólicas	46
Tabla 3. Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a tamaño y potencia	56
Tabla 4. Características de pequeños y micro aerogeneradores disponibles en el comercio.....	57
Tabla 5. Configuraciones en Aerogeneradores.....	68
Tabla 6. Disponibilidad de energía solar por regiones	82
Tabla 7. Rendimiento de celdas y módulos solares.	89
Tabla 8. Clasificación de los sistemas híbridos E-D según la penetración.....	122
Tabla 9. Parámetros del aerogenerador.....	139
Tabla 10. Parámetros Generador de inducción.....	140
Tabla 11. Parámetros conjunto motor-generator.....	141
Tabla 12. Parámetros generador sincrónico	142

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Descripción de modelos	165
Anexo B. Aplicaciones de los generadores Diesel como fuente primaria en Colombia.	171
Anexo C. Almacenamiento de energía.....	173
Anexo D. Características de Inversores	181
Anexo E. Sistema de Puesta a Tierra y Apantallamiento	186
Anexo F. Mapa de velocidades promedio anuales del viento a 10 y 50 metros de la superficie	194
Anexo G. Políticas de gobierno y referentes normativos.....	196
Anexo H. Tabla de Sistemas Híbridos a nivel mundial.....	201
Anexo I. Artículo Publicable	202
Anexo J. CD con simulación en pscad del Sistema Híbrido E-D.....	213
Anexo K. Anteproyecto.....	214

LISTA DE SIGLAS

ASIF: Asociación de la Industria Fotovoltaica.

EE. UU. : Estados Unidos.

EPIA: European Photovoltaic Industry Association (Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica).

CA: Corriente Alterna.

CD: Corriente Directa.

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas.

FAER: Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas.

FAZNI: Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas.

FV: Fotovoltaico.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

IEC: International Electrotechnical Commission (Comité Electrotécnico Internacional).

PMSG: Permanent magnet synchronous generator (Generador sincrónico de Imanes Permanentes).

PURPA: Public Utility Regulatory Policies Act (Ley de Normas Regulatorias de Empresas de Servicios Públicos).

SCIG: Squirrel cage induction generator (Generador de Inducción Jaula de Ardilla).

SIN: Sistema Interconectado Nacional.

SPT: Sistema de Puesta a Tierra.

UNESA: Asociación Española de la Industria Eléctrica.

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia.

WRIG: Wound rotor induction generator (Generador de Inducción de Rotor Devanado).

WRSG: Wound rotor synchronous generator (Generador Sincrónico de Rotor Devanado).

ZNI: Zona No Interconectada

GLOSARIO

Aerogenerador: Máquina que transforma la energía del viento en energía eléctrica.

Anemómetro (aerogenerador): El anemómetro se utiliza para medir la velocidad del viento. Sus señales son empleadas por el controlador electrónico para conectar el aerogenerador cuando el viento alcance la velocidad de arranque.

Área del rotor (aerogenerador): En los aerogeneradores el área se mide verticalmente. El área del disco cubierto por el rotor y las velocidades del viento determinan cuánta energía se puede recoger en un año. Si se dobla el diámetro del rotor se obtiene un área de barrido cuatro veces superior. Esto significa que la potencia disponible también será cuatro veces mayor.

Barlovento (aerogenerador): De frente al viento.

Batería: También se denomina acumulador eléctrico o simplemente acumulador. Dispositivo que almacena energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces.

Biocombustible: Se entiende cualquier tipo de combustible líquido, sólido o gaseoso, proveniente de la biomasa (materia orgánica de origen animal o vegetal).

Buje (aerogenerador): Centro del rotor donde se unen las palas de una turbina eólica.

Celda o célula fotovoltaica: Unidad básica de producción de energía eléctrica por conversión fotovoltaica de luz solar en electricidad.

Coeficiente de potencia (aerogenerador): El coeficiente de potencia mide la eficiencia con la que el aerogenerador convierte la energía eólica en electricidad. Se obtiene dividiendo la potencia eléctrica disponible entre la potencia eólica de entrada, y es una medida de la eficiencia.

Combustibles fósiles: Son recursos no renovables; son mezclas de compuestos orgánicos que se extraen del subsuelo con el objetivo de producir energía por combustión. Existen tres tipos de combustibles fósiles que pueden usarse para la provisión energética: carbón, petróleo y gas natural.

Control active stall (aerogenerador): “Regulación (activa) por pérdida aerodinámica”, técnicamente el funcionamiento es muy parecido al control por cambio del ángulo de paso (control pitch), la diferencia radica en que, si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Control pitch (aerogenerador): “Regulación por cambio del ángulo de paso”, básicamente lo que hace este control es lo siguiente: cuando la potencia generada por la turbina alcanza un valor demasiado alto, el controlador electrónico de esta, envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la

inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. Las palas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso).

Control stall (aerogenerador): “Regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica”, este es un control en el cual los aerogeneradores tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. La característica de este control está en el diseño aerodinámico en el perfil de la pala para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor.

Controlador electrónico (aerogenerador): Posee un ordenador que continuamente monitorea las condiciones del aerogenerador y controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción, automáticamente detiene el aerogenerador y avisa al ordenador del operario encargado de la turbina.

Densidad del aire: Masa por unidad de volumen. La energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen, esto es, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

Disponibilidad (aerogenerador): Relación entre el número de horas en las que un aerogenerador produce energía y el número de horas en que han existido velocidades de viento dentro del rango de funcionamiento del aerogenerador.

Energías alternativas: Aquellas que por su desarrollo y demanda, así como por su sitio de aplicación son costosas, y poco competitivas comercialmente con las convencionales aunque su impacto ambiental y sociopolítico es muy bajo dentro

de las cuales se tienen la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica y pequeñas centrales hidroeléctricas.

Energía Convencional: Es aquella técnica y económicamente más desarrollada y utilizada con la cual se obtiene la energía eléctrica.

Energía limpia: Una energía se considera limpia cuando su utilización no tiene riesgos potenciales añadidos, y suponen un nulo o escaso impacto ambiental. Prácticamente no existe una energía limpia en un 100%. Las alteraciones que pueda provocar una energía limpia -considerando su ciclo de vida-, no son relevantes como para alterar ecosistemas, ciclos hidrológicos, o generar residuos que la naturaleza no pueda asimilar previamente tratados. Las energías limpias, son renovables y compatibles con sociedades sustentables.

Emisiones de carbono: Son gases contaminantes, producidos por la quema o combustión de combustibles fósiles. Causantes del calentamiento del planeta y cambio climático.

Factor de carga: Para conocer la producción anual de energía de una máquina eléctrica se divide la producción anual de energía entre la producción teórica máxima, si la máquina estuviera funcionando a su potencia nominal (máxima) durante las 8760 horas del año. Este factor suele rondar el 20 o 30%.

Factor de potencia o coeficiente: Relación entre la potencia activa y aparente. Este valor se mide de 0 a 1; entre más cercano se encuentre a la unidad se está utilizando la energía de una forma más optima. Este factor sólo aparece en máquinas con devanados.

Fluctuación: Variación, oscilación, cambio alternativo. Por ejemplo: fluctuaciones de tensión, de velocidad, de potencia.

Fuerza motriz (aerogenerador): Par generado por las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas en el eje del rotor provocando el movimiento de éste.

Generador síncrono de Imán Permanente: También denominado generador síncrono bipolar de imán permanente. Es síncrono porque el imán del centro girará a una velocidad constante síncrona (girando exactamente como el ciclo) con la rotación del campo magnético y bipolar porque tiene un polo norte y un polo sur. Se llama generador de imán permanente debido a que el rotor es un imán permanente, y no un electroimán.

Góndola (aerogenerador): Dentro de la góndola se encuentran el multiplicador y el generador eléctrico, dos de los componentes claves del aerogenerador. Para acceder al interior de la góndola ha de hacerse desde la torre de la turbina. El rotor del aerogenerador, formado por las palas y el buje, está situado a la izquierda de la góndola.

Ley de Betz (aerogenerador): Es la ley que establece el máximo de potencia que puede absorber un aerogenerador ideal del viento para convertirla en energía mecánica útil.

Lingote (fotovoltaica): Barra de poli -silicio de la cual se extraen las Unidades básicas de conversión de energía Fotovoltaica (obleas).

Mecanismo de orientación (aerogenerador): Dispositivo con que cuentan los aerogenerador que tiene por función girar el rotor de la turbina en contra del

viento, de forma que pase a través del rotor la mayor proporción posible de energía eólica.

Multipalas (aerogenerador): Tipo de aerogenerador de baja velocidad caracterizado por su gran número de palas así como por la disposición del eje de giro perpendicular a la velocidad del viento y que presenta una forma adecuada para su uso aerodinámico.

Multiplicador (aerogenerador): Sistema mecánico inverso al reductor de velocidad que mediante un conjunto de engranajes comunica al eje arrastrado o de salida una velocidad de giro mayor que la del eje motor o de entrada.

Obleas o discos (fotovoltaica): Material base para la construcción de las células, fabricada en poli-silicio de pureza variable.

Pala (aerogenerador): Elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico transforma la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del generador.

Par mecánico (aerogenerador): Momento respecto al eje de rotación de la fuerza transmitida por el motor.

Parque eólico (aerogenerador): Instalación eólica que comprende varios aerogeneradores y su infraestructura eléctrica, de medición y control correspondiente. Existen dos tipos de parques o conjuntos dependiendo de su ubicación continental (ONSHORE), o sobre el agua(OFFSHORE).

.

Penetración de energía eólica (aerogenerador): Se define como el coeficiente entre la salida instantánea de potencia del aerogenerador y la demanda instantánea de potencia de la carga primaria.

Pérdida aerodinámica (aerogenerador): Condición aerodinámica caracterizada por la pérdida de la fuerza de sustentación del perfil de pala.

Poli-silicio (fotovoltaica): Forma en que se presenta el silicio grado semiconductor antes de fabricar lingotes.

Potencia del viento (aerogenerador): Es la potencia que posee el viento, de la cual el aerogenerador absorberá una parte. Los parámetros de los que depende son: área del rotor, velocidad del viento y la densidad del aire.

Radiación electromagnética: Es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

Radiación solar: Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol.

Recursos Naturales No Renovables: Bienes cuya renovación o recuperación puede tomar miles o millones de años. Ejemplo de éstos son los combustibles fósiles y los minerales. De éstos elementos las sociedades modernas se nutren para generar la gasolina, el plástico, el aluminio y el vidrio entre otros.

Recursos Naturales Renovables: Bienes que tienen la capacidad de regenerarse por procesos naturales. Entre ellos se encuentran la luz, el aire, el agua, el suelo, los árboles y la vida silvestre.

Semiconductor (fotovoltaica): Material con propiedades conductoras intermedias entre un conductor y un aislante. La luz y la temperatura pueden disminuir su resistencia eléctrica produciendo el efecto fotovoltaico o termovoltáico respectivamente.

Silicio grado semiconductor (fotovoltaica): Silicio apropiado para su uso en la industria microelectrónica y fotovoltaica.

Silicio monocristalino (fotovoltaica): Las celdas solares de silicio monocristalino se fabrican a partir de un único cristal de silicio extraído de un baño de silicio fundido. Durante el proceso de fabricación de las células, las láminas de silicio obtenidas a partir de este único cristal cilíndrico son tratadas hasta convertirlas en células solares de silicio monocristalino.

Silicio policristalino (fotovoltaica): Se trata de un método de colado, en el que se funde silicio en un gran horno cerámico y se deja simplemente solidificar en un molde cuadrado hasta formar un bloque que se corta en trozos más pequeños; finalmente, estos trozos se cortan en rebanadas para obtener las obleas. El rendimiento es más bajo debido a las imperfecciones en la estructura cristalina resultando del proceso de moldeo, por lo tanto no son tan eficientes como las celdas monocristalinas.

Sotavento (aerogenerador): Detrás del viento.

Torre (aerogenerador): Soporta la góndola y el rotor. Es mejor cuanto más alta ya que a mayor altura mayores velocidades de viento. Las torres pueden ser tubulares (más seguras) o, de celosía (más baratas).

Unidad de refrigeración (aerogenerador): La unidad de refrigeración está compuesta por un ventilador eléctrico y una unidad de refrigeración de aceite. El primero se utiliza para enfriar el generador eléctrico y el segundo para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

Velocidad media anual del viento (aerogenerador): Valor medio del módulo de la velocidad del viento en un emplazamiento y altura dados a lo largo de un año.

RESUMEN

Las energías renovables o limpias, constituyen un grupo de fuentes con gran potencial de desarrollo, por su tecnología, bajo impacto ambiental y por su tendencia a ser viables económicamente. Otro factor importante, es que el uso de estas tecnologías satisface las necesidades energéticas de zonas aisladas de la red. En muchos casos la producción en dichas zonas resulta costosa, por lo cual, combinar estrategias de generación -*Sistemas Híbridos*- deriva en mejoras técnicas y económicas.

El presente trabajo de grado tiene como finalidad el estudio de los sistemas híbridos Eólico-Diesel (E-D) y Eólico-Solar (E-S). Se parte de un completo análisis bibliográfico, posteriormente se describe las tecnologías mencionadas de manera independiente, finalmente se analiza el comportamiento de los sistemas agregados como un todo y se implementa a modo de ejemplo una simulación en EMTDC-PSCAD.

En aras de complementar el estudio, se presenta la información encontrada en relación a la situación actual a nivel nacional y mundial, de la aplicación y desarrollo de los sistemas trabajados y su respectivo impacto en el sector social e industrial. Además, se describe la situación energética actual de las Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia y los respectivos recursos disponibles en estas.

Es importante manifestar que en Colombia, no se posee una regulación clara para la Generación Eólica y valdría la pena apoyar éstas iniciativas, así como los sistemas híbridos, mediante el reconocimiento de reducciones de Gases de Efecto Invernadero – GEI y/o facilitar y apoyar los mismos, como Mecanismos de Desarrollo Limpio- MDL, ante entidades mundiales y países que compren los bonos correspondientes. Para los sistemas híbridos, objeto de la tesis, es conveniente hacer énfasis en realizar gestiones ante las autoridades energéticas y

ambientales, para facilitar su financiación y ejecución, mediante el FAZNI y el FAER.

PALABRAS CLAVES: SISTEMA HÍBRIDO ED-ES, ENERGÍAS RENOVABLES, GEI, ZNI.

INTRODUCCIÓN

La energía se relaciona estrechamente con el desarrollo económico y social, como insumo intermedio en el proceso productivo y como bien final para la satisfacción de las diferentes necesidades de la población y el mejoramiento de su bienestar.

Uno de los principales recursos energéticos en Colombia y en el mundo es el petróleo, se estima que cerca del 80% de la energía total producida en el mundo proviene de combustibles fósiles. Esto plantea un desafío para las compañías de energía, ya que las concentraciones de gases contaminantes están creciendo rápidamente como consecuencia de la acción humana. El uso generalizado de los combustibles fósiles, el debilitamiento de la capa de ozono y la destrucción de las masas forestales están favoreciendo el aumento de la temperatura de la Tierra, provocando cambios drásticos en el clima mundial y haciéndolo cada vez más impredecible.

Actualmente se sabe que la generación de energía eléctrica es la responsable de producir un 35% de emisiones de carbono en el mundo, el otro 65% corresponde (Transporte 20%, Procesos Industriales 20%, Sector residencial y Comercial 25%). De ahí parte la gran utilización de las energías renovables ya que estas presentan una buena viabilidad económica y además no generan gases contaminantes.

En el presente trabajo de grado se estudian y definen los sistemas híbridos *Eólico-Diesel (E-D)* y *Eólico-Solar (E-S)*, que son considerados tecnologías para la producción de energía limpia. Se analiza el proceso de generación y funcionamiento, y se exponen las ventajas y desventajas. También se incluye el estado del arte, principales parámetros, el potencial de cada una de estas tecnologías, los principales componentes que los conforman, y las diferentes aplicaciones tanto para sistemas conectados a la red como para los aislados y su forma de almacenamiento respectivo.

Una de las principales aplicaciones de los sistemas híbridos es que permiten la generación de energía en lugares remotos, en Colombia llamados Zonas No Interconectadas (ZNI). En estos sitios no llega la red de transmisión, ni distribución debido a lo alejados que se encuentran de la cabecera municipal, por condiciones del terreno, o por problemas sociales. En la mayoría de estas zonas el abastecimiento energético se hace por medio de energías convencionales típicamente con generadores diesel.

Los sistemas híbridos surgen como una solución económica y medioambiental para suplir las necesidades energéticas de las ZNI, ya sea agrupando el generador diesel con un sistema eólico o fotovoltaico, para la disminución del consumo de combustible ó si se dispone de un gran potencial de viento y de radiación solar se puede formar un sistema híbrido E-S para la producción de energía.

El interés por realizar e investigar acerca de este tema surge dentro del Grupo de Investigación TyD como apoyo a la investigación; debido a que las energías renovables están tomando cada vez mayor fuerza y es un tema del cual no se ahondado mucho, teniendo en cuenta que en Colombia hay gran potencial eólico y solar, principalmente en la Guajira; partiendo de esto, se pueden aprovechar estas condiciones para la producción de energía eléctrica mediante energías alternativas.

El trabajo está estructurado de tal manera que en el primer capítulo se hace una introducción a las energías renovables, y en los siguientes cuatro capítulos se describe la historia, la importancia, estado actual, características, aspectos técnicos de los sistemas E-S y E-D y el potencial de estos recursos en Colombia y a nivel mundial.

En el capítulo seis se realiza la simulación del control de un sistema híbrido E-D con carga constante y se analiza la respuesta ante diferentes cambios de viento. El software utilizado para la modelación del sistema fue EMTDC-PSCAD.

En la parte final del trabajo se aborda de forma particular los diferentes tipos de almacenamiento de energía, casos típicos de generación aislada en Colombia, apantallamiento y sistema de puesta a tierra (SPT) de un parque eólico, y las normas internacionales que rigen e incentivan la utilización de las energías renovables.

Todo lo que se encuentra aquí es la apropiación de una tecnología hasta ahora poco trabajada en nuestro país, que busca producir energía de manera limpia y económica, para suplir las necesidades de las Zonas No Interconectadas.

1. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

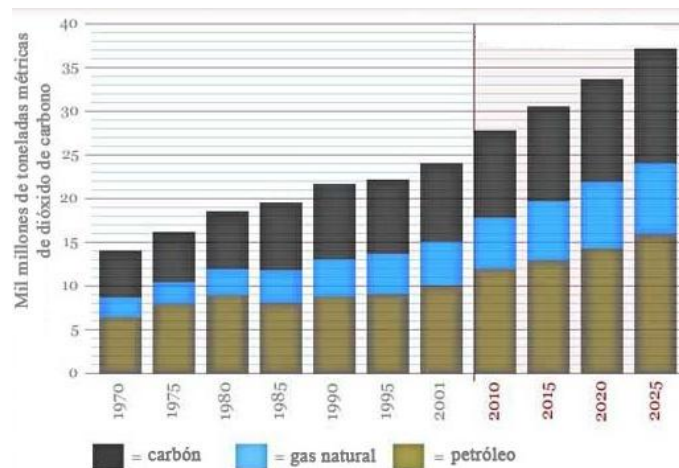
Desde finales del siglo XX los países industrializados han entrado en una concientización de disminución de emisiones de CO₂ a la atmosfera, además de esto se ven impulsados por las nuevas políticas ambientales. Tres cuartas partes de las emisiones globales de carbono provienen de combustibles fósiles, concretamente del carbono, el petróleo y el gas natural ver figura 1. El resto es, en su mayoría consecuencia de la deforestación. De los cuatro principales sectores que contribuyen a estas emisiones, la generación de electricidad es responsable de la mayor parte: en un 35%, Colombia en dicha participación aporta el 0,2% de las emisiones de GEI, considerando la ventaja competitiva que tiene el país al poseer un recurso hídrico abundante.

El transporte y los procesos industriales son responsables de un 20% cada uno, mientras que el 25% restante proviene de edificios residenciales y comerciales¹. Las emisiones de carbono derivadas de los combustibles fósiles se originan principalmente en cinco países: China, EE. UU., Unión Europea, India y Rusia. Las emisiones de CO₂ de China, se estima que son alrededor del 14% más altas que la de los EE. UU.; con ello, China encabeza la lista de países emisores de CO₂, teniendo aproximadamente una cuarta parte (24%), seguido por los EE. UU.

¹ BUCKLEY, Lila. Las emisiones de dióxido de carbono causadas por la actividad humana, el motivo principal del calentamiento del planeta y del cambio del clima, alcanzan un récord histórico. [En línea]. s.l: El Autor, 2004. <Disponible en: <http://www.terra.org/articulos/art01121.html>> [consulta: 21 Oct. 2009]

(21%), la Unión Europea (12%), India (8%) y Rusia (6%). Juntos, comprenden el 71% de las emisiones mundiales de CO₂. Sin embargo, dado que el tamaño de la población y el nivel de desarrollo económico difieren considerablemente entre los países, las emisiones expresadas por persona muestran en EE.UU., Rusia, UE-15, China y la India son actualmente alrededor de 19.4, 11.8, 8.6, 5.1 y 1.8 toneladas de CO₂, respectivamente.

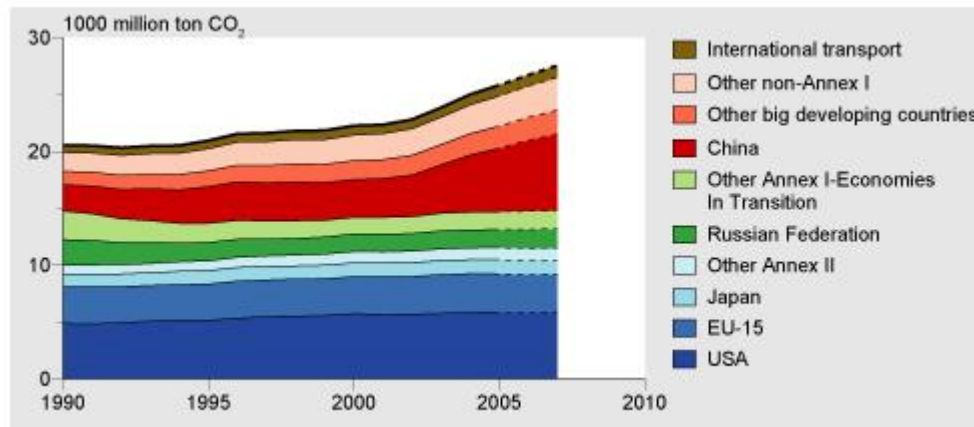
Figura 1. Emisiones Mundiales de CO₂



Fuente: ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION(EIA). International Energy annual 2005. Projections: EIA. EE. UU.: World Energy Projections Plus, 2008. p.1.

En la figura 2, se observa la cantidad de emisiones de CO₂ producidas en diferentes regiones del mundo. El patrón de los últimos años, ha experimentado un fuerte crecimiento de la demanda en China y el resto de Asia-Pacífico, debido al continuo crecimiento económico.

Figura 2. Emisiones Mundiales de CO₂ por países



Fuente: STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY BP. Global fossil CO₂ emissions for 2006. En: Netherlands Environmental Assessment Agency. [En línea]. Netherlands: International Energy Agency, 2007. <Disponible n: <http://www.pbl.nl/en/dossiers/Climatechange/moreinfo/Chinanowno1inCO2emissionsUSAinsecondposition.htm> > [consulta: 20 Nov.2008]

Como consecuencia del aumento constante de las emisiones de carbono, la cantidad de CO₂ en la atmósfera ha subido en un 31% desde 1750. Normalmente, la naturaleza absorbe una gran parte de las emisiones de carbono a través de los océanos y los bosques, conocidos como “sumideros de carbono”, y reduce de esta manera el ritmo de acumulación en la atmósfera. Pero las tendencias recientes sugieren que las emisiones están superando la capacidad de absorción. Durante las dos últimas décadas, las concentraciones atmosféricas de CO₂ han aumentado cada año una media de 1,5 partes por millón (ppm). Aun así, en los dos últimos años se han registrado aumentos inexplicables y alarmantes. Esto sugiere que la capacidad de los sistemas naturales de la tierra por asimilar el aumento de las emisiones se está debilitando.

Ante todo esto, surgen tecnologías para reducir las emisiones de carbono. Cambiar nuestra dependencia de los combustibles ricos en carbono, como el carbón y el petróleo, por energías renovables y gas natural bajo en carbono puede

reducir considerablemente las emisiones. La energía eólica, por ejemplo, actualmente produce la suficiente energía sin carbono para suministrar electricidad a 150 millones de personas en todo el mundo, y el potencial aún es mucho mayor. Las personas están empezando a darse cuenta de los beneficios de esta fuente energética, y el uso de la energía eólica está aumentado en promedio en el mundo un 40% cada año.

Aun así, se prevé que la mayor parte del crecimiento de las emisiones en las próximas décadas provenga de los países en vía de desarrollo.

1.1 IMPORTANCIA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Energía renovable es aquella que se produce en forma continua, por lo que se le considera inagotable. Aprovecha directamente los recursos como el sol, aire, agua, calor interior de la tierra, la vegetación².

El uso de fuentes convencionales para la producción de energía eléctrica; proviene de recursos no renovables (combustibles fósiles), estos son recursos naturales agotables que no se pueden regenerar una vez han sido utilizados. Caso contrario ocurre con las energías renovables, debido a que provienen de recursos que están relacionados con ciclos naturales del planeta y se puede hacer uso permanente de estos. Además las energías renovables favorecen a la

² UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Energías renovables: descripción, tecnologías y usos finales. [En línea]. s.l. Subdirección de Planeación Energética, s.f. <Disponible en: http://www.upme.gov.co/Cartilla_virtual/Ener_Alterna.swf> [consulta:19 May. 2008]

conservación del medio ambiente, la reducción de gases contaminantes y la dependencia económica de otros países.

La dependencia del petróleo, el carbón y el gas ha generado conflictos políticos y ambientales; por esta razón en los últimos años se ha hecho necesario invertir en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen con recursos renovables. Esto a su vez hace necesario una mejor administración de los recursos locales. Además, en el mundo entero el término renovable se asocia con un medio ambiente más limpio, apropiado para nosotros y las futuras generaciones. Actualmente las energías renovables cubren cerca del 20% del consumo mundial de electricidad.

Se pueden destacar las siguientes ventajas de las energías renovables respecto a las energías convencionales³:

	Energías Renovables	Energías Convencionales
Ventajas medioambientales	Las energías renovables no producen emisiones de CO₂ ni otros gases contaminantes a la atmósfera. Las energías renovables no generan residuos de difícil tratamiento. Las energías renovables son inagotables.	Las energías producidas a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). La energía nuclear y los combustibles fósiles generan residuos que suponen durante generaciones una amenaza para el medioambiente. Los combustibles fósiles son finitos.

³ MADRID SOLAR. Guía de la energía solar. Madrid: Industrias Graficas el Instalador, 2006. p.10.

Ventajas estratégicas	Las energías renovables son autóctonas.	Los combustibles fósiles existen sólo en un número limitado de países.
	Las energías renovables disminuyen la dependencia exterior.	Los combustibles fósiles son importados en un alto porcentaje.
Ventajas socioeconómicas	Las energías renovables crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales*.	Las energías tradicionales crean muy pocos puestos de trabajo respecto a su volumen de negocio.

* En las etapas de construcción, manufactura e instalación se requieren alrededor de 15 personas-año/MW para eólica y casi 40 personas-año/MW para FV. Mientras para etapas de operación y mantenimiento el número decrece alrededor de 0.4 empleos por MW para ambos casos.

1.2 ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA

Aunque la aplicabilidad de sistemas alternos de generación o energías no convencionales es relativamente incipiente, en Colombia se ha avanzado en el proceso de identificación y reconocimiento de la potencialidad de estos recursos en diversas zonas del país, incluyendo las Zonas No Interconectadas (ZNI). Sin embargo, se requiere de una adecuada investigación e implementación de proyectos pilotos de estas posibles alternativas, que involucre la máxima participación de las comunidades.

Uno de los programas adelantados en la actualidad con base en el uso de energías no renovables en el país es la producción de biocombustibles. La producción de alcohol carburante es alrededor de un millón de litros diarios, que cubre el 57% de la demanda de gasolina oxigenada en el territorio nacional. Con respecto al biodiesel, está planeado producir ACPM a partir de aceite de palma para sustituir un 5% de la demanda nacional.

Las ZNI de Colombia poseen importantes recursos que permiten la implementación de tecnologías limpias del tipo eólico, hídrico o fotovoltaico. En la actualidad en el país se han empezado a utilizar algunas de las tecnologías para la obtención de energías limpias, no obstante, su uso es aún muy precario.

En la siguiente tabla se describen algunas características de las energías renovables en Colombia en el año 2006, con sus diferentes aplicaciones y capacidad instalada.

Tabla 1. Energías alternativas disponibles en Colombia en 2006

FUENTE	CONOCIMIENTO DEL RECURSO	APLICACIONES	ESTADO	CAPACIDAD INSTALADA
Eólica	Atlas de energía eólica y vientos de Colombia (velocidades y densidades energéticas) (Ver anexo F)	Bombeo de agua Generación eléctrica en sistemas aislados. Generación eléctrica para suministro al SIN.	Todos se aplican	No Disponible 50 kW marginal Jepirachi 19.5 MW
Solar	Atlas de radiación solar de Colombia (Distribución de radiación anual y mensual)	Sistemas fotovoltaicos Colectores solares	Aplicada con problemas de calidad y de eficiencia	< 2 MW
Biomasa	Estimativo preliminar	Calderas - cogeneración, Obtención de biodiesel, cocción, generación eléctrica, descontaminación de aguas	Poco aplicada	< 25 MW solo bagazo <100 MW combinado bagazo y carbón, Excedente de producción de aceite de palma suficiente para suplir potencialmente el 5% de la demanda nacional de ACPM
Hidráulica	Información abundante de caídas, caudales y recursos hídricos	Generación eléctrica a baja escala	Se aplica a costos altos	< 168 MW
Geotérmica	Mapas de recursos geotérmicos Estudios preliminares de zonas de interés	Generación eléctrica Suministro de calor	No se aplica Experimentos con invernaderos y calefacción	No Disponible

Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Información del Plan Energético Nacional. En: Contexto y Estrategias 2006-2025. Bogotá: el Autor, 2005.p48.

1.3 MARCO LEGAL

Las energías renovables tienen un amplio enfoque de utilización, tanto como un medio sostenible, como para nuevas soluciones a la energía convencional.

La regulación y política energética tienen un impacto directo en el desarrollo y funcionamiento de los mercados energéticos y las redes de energía reguladas.

En Colombia el marco regulatorio general en que se encuentra soportado el mercado de la electricidad y del cual forma parte las energías renovables como fuentes alternas de generación, se basa fundamentalmente en la constitución Política de Colombia que determinan los principios para la prestación de los servicios públicos domiciliarios, las regulaciones de la CREG y las leyes del Congreso de la República tales como la ley mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía enfocado a las fuentes alternas y la cogeneración.

Además de esto, se encuentran algunas medidas internacionales adoptadas por Colombia en el área ambiental, siendo el de mayor relevancia el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - Ley 164 de 1995-, teniendo en cuenta esto, a continuación se hace referencia a la legislación Internacional (ver anexo G), en donde se amplía la información en cuanto a referentes normativos en algunos países como España y EE. UU.

1.3.1 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto especifica objetivos y programas de obligado cumplimiento legal para conseguir una disminución de gases de efecto invernadero por los países desarrollados de hasta un 5% de las emisiones en el periodo de 2008-2012 en relación con los niveles de 1990. El Protocolo fue suscrito inicialmente por 84 países, y desde entonces lo han ratificado o han accedido a él 166.

El Protocolo de Kioto busca regular las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Para poder entrar en vigor, el Protocolo requiere la ratificación de al menos 55 países, responsables del 55% de las emisiones de CO₂ de los países (industrializados). El Protocolo entró en vigor y adquirió la condición de obligado cumplimiento legal el 16 de febrero de 2005.

Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos.

Los países que se encuentran en el proceso de Kioto, deben emplear diferentes mecanismos comerciales diseñados en el Protocolo. Estos son denominados 'mecanismos flexibles', el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y la Implantación Conjunta (IC), son algunos de ellos.

El Mecanismo de Desarrollo Limpio, permite a los países industrializados invertir en proyectos destinados a países en vías de desarrollo que contribuyan a la reducción de las emisiones de gases invernadero en esos países. Un ejemplo sería la financiación por parte de Canadá de un proyecto de eficiencia energética en China, o la financiación por Japón de un proyecto de energía renovable en Marruecos.

La Implantación Conjunta, permite a los países industrializados que se hayan marcado objetivos de reducción de emisiones cooperar para conseguirlos. Por ejemplo, las reducciones de emisiones por proyectos de energía renovable en Hungría financiados por Noruega, podrán ser asignadas a los países que las financian. En teoría, es una vía económicamente más eficiente para que los países industrializados generen las mismas reducciones de emisiones generales.

Este primer capítulo realza el interés por el uso de las energías renovables, su importancia y ventajas en el mundo actual. Además cada una de las tecnologías renovables se convierten en una alternativa energética para algunas zonas aisladas como las ZNI en Colombia, logrando obtener una solución sostenible apartir de la adopción de mecanismos de desarrollo limpio que ayuden a mitigar las emisiones de gases contaminantes. En el siguiente capítulo se tratará la primera de las tecnologías de energías renovables: *La Energía Eólica*, partiendo desde sus inicios, continuando con la descripción, potencias a nivel mundial y estado actual de está tecnología.

2. ENERGÍA EÓLICA

2.1 HISTORIA DE LA ENERGÍA EÓLICA

El viento ha sido una de las fuentes de energía más utilizada por el hombre a través de su historia. En sus inicios era aprovechado para diversas aplicaciones con los llamados molinos de viento, en labores como molienda de grano, bombeo de agua, navegación a vela y sistemas de fuerza motriz, hasta llegar en la actualidad a la generación de energía eléctrica.

Desde el siglo XIII los molinos de eje horizontal, formaban parte importante en la economía rural y sólo entraron en desuso con la llegada de los combustibles fósiles y la electrificación rural.

El uso de molinos de viento para generar electricidad se remonta a finales del siglo XIX con un aerogenerador de 12 kW CD construido por Charles F. Brush en EE. UU. y la investigación realizada por Poul La Cour en Dinamarca. Sin embargo en gran parte del siglo XX hubo poco interés en la generación de energía eólica con excepción de su uso para cargar las baterías y en viviendas alejadas; esto fue sustituido rápidamente una vez el acceso a la red eléctrica se expandió.

Posteriormente, aparece la turbina de 1250 kW construida por Smith-Putnam en los EE. UU. en 1941. Esta máquina se caracterizó porque tenía un rotor de acero

con un diámetro de 53 m. El diseño de Putnam se basó en un rotor a sotavento* con regulación variable de ángulo de paso, su diseño era totalmente diferente a los creados por estas épocas. Aunque la turbina de Putnam no fue la más exitosa debido a que una de las palas falló catastróficamente en 1945, seguía siendo la turbina de viento más grande construida durante los siguientes 40 años⁴.

En la siguiente tabla, se muestra una visión general de la evolución histórica de los aerogeneradores.

* Sotavento: Detrás del viento.

⁴ BURTON, Tony y otros. Wind energy: handbook. England: John Wiley & Sons, 2002. p.2.

Tabla 2. Historia de las Turbinas Eólicas

Turbina y País	Diámetro	Área de barrido	Potencia	Potencia específica	Número de palas	Altura de la Torre	Fecha en Servicio
	(m)	(m ²)	(kW)	(kW/m ²)		(m)	
Poul LaCour, Dinamarca	23	408	18	0.04	4	----	1891
Smith Putnam, Estados Unidos	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
F. L. Smidth, Dinamarca	17	237	50	0.21	3	24	1941
F. L. Smidth, Dinamarca	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser, Dinamarca	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hutter, Alemania	34	908	100	0.11	2	22	1957

Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.8.

En Dinamarca se construyó el aerogenerador Gedser en 1957, su capacidad de generación era de 200 kW para una velocidad de viento de 15 m/s. Esta máquina era conectada al sistema de potencia Danés y produjo alrededor de 400.000 kWh al año. La torre era de 25 m de altura y tenía un rotor de 24 m de diámetro.

Al mismo tiempo el profesor Ulrich Hutter de Alemania construyó una máquina de 100 kW en 1957. Llegaba a su potencia nominal para una velocidad del viento de 8m/s, lo cual es sustancialmente más bajo que las máquinas mencionadas anteriormente. Hutter desarrolló un nuevo diseño de aerogenerador de dos palas

de fibra de vidrio delgado, a sotavento y montado sobre una torre de hierro. La turbina de Hutter fue muy conocida por su alta eficiencia y obtuvo más de 4000 horas de potencia nominal a pleno funcionamiento durante los siguientes 11 años, una cantidad considerable para una máquina experimental. Esto constituyó una importante contribución al diseño de futuros aerogeneradores.

A pesar del temprano éxito de Hutter, los intereses de la generación eólica a gran escala se redujeron después de la segunda guerra mundial. Sólo se construían pequeñas turbinas eólicas para zonas alejadas al sistema de energía o se utilizaban para cargar baterías.

Con la crisis del Petróleo a comienzos de la década de 1970, regresó el interés en la generación de energía eólica. Como resultado a esto los gobiernos prestaron apoyo financiero a la investigación y desarrollo de la energía eólica. Países como Alemania, EE. UU. y Suecia utilizaron estos recursos para desarrollar grandes diseños de aerogeneradores. Sin embargo, es preciso reconocer que muchos de estos prototipos no tuvieron mucho éxito debido a diversos problemas técnicos y de funcionamiento (por ejemplo: el control pitch).

En algunos gobiernos el interés superó las expectativas, hasta el punto de generarse verdaderas políticas de apoyo, una de ellas fue la *Política de Regulación de Servicios Públicos (PURPA)*, aprobada por el congreso de los EE. UU. en 1978; con esta ley, el Presidente Carter y el Congreso de los EE. UU. motivaron el interés nacional por la conservación de la energía, la eficiencia, y por lo tanto la disminución de la dependencia del país del petróleo extranjero. Fue con el apoyo de PURPA en asocio con la política de créditos fiscales especiales para programas de energías renovables, que se logró el primer auge de la energía eólica en la historia. Se instalaron grandes parques eólicos a lo largo de las montañas al este de San Francisco y al noreste de California. El primero de estos

parques se construyó con aerogeneradores de 50 kW; con el paso de los años el tamaño de los aerogeneradores aumentó hasta los 200 kW a finales de 1980.

La mayoría de los aerogeneradores eran traídos desde Dinamarca. A finales de 1980, alrededor de 15000 aerogeneradores fueron instalados en California con una capacidad aproximada de 1500 MW.

Hoy en día se habla de máquinas de hasta 6MW y un constante crecimiento en Europa (Alemania, España, Inglaterra), Asia (India y principalmente China) y desde luego EE.UU. que actualmente posee la mayor capacidad instalada del mundo⁵.

2.2 EÓLICA A NIVEL MUNDIAL

El sector de las energías renovables ha tenido un gran desarrollo influenciado por los altos costos en el precio del petróleo, las mejoras tecnológicas, y las preocupaciones ambientales con los diferentes acuerdos internacionales que han tenido y continuarán teniendo una importante influencia en la transición hacia combustibles y tecnologías más limpias.

Según la AWEA* a finales de 2003 se contaba a nivel mundial con una cantidad de energía generada mediante turbinas eólicas de 39.341 MW y sólo durante ese año el crecimiento porcentual fue del 26%.

La mayoría de la capacidad instalada en energía eólica en 2008 corresponde a EE. UU. siendo el líder con 25.170 MW; el excepcional crecimiento reciente en este país, es en gran parte, debido a una extensión de las actuales tasas del

⁵ ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.11.

* American Wind Energy Association

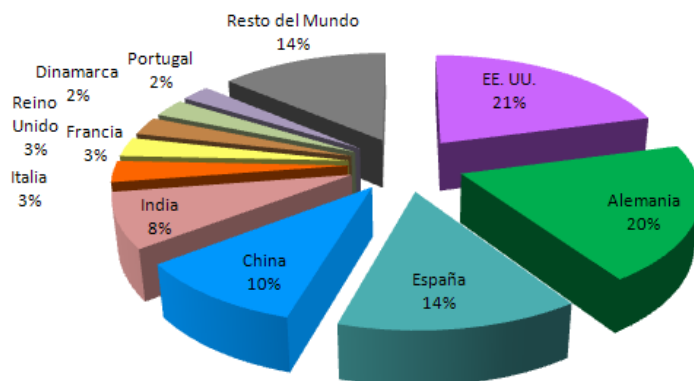
impuesto de producción eólica bajo la ley de 2005 de política energética (2005 Energy Policy Act). Ocupó el primer lugar en nuevas instalaciones de 2008 con 8.358 MW.

En orden de importancia sigue Alemania con 23.903 MW instalados, este país ocupó el primer lugar hasta 2007, pero debido a la saturación de espacios terrestres convenientes y a una disminución de la tarifa de venta para la energía del viento ha reducido su crecimiento en capacidad instalada. A nivel nacional, Alemania genera más del 5% de su electricidad con el viento. En los estados norteros de Sajonia-Anhalt, de Mecklenburg-Pomerania Occidental y de Schleswig-Holstein, el viento resuelve un 30% de las necesidades de electricidad.

Continuando en orden descendente se encuentra España con 16.754 MW, suministrando el 10% de la capacidad energética nacional mediante generación eólica. Otros países que siguen la escala son China con 12.210 MW quien fue el segundo en nuevas instalaciones en el 2008 con 6.300 MW, e India con una de capacidad de 9645 MW⁶. En la figura 3, se aprecia la capacidad instalada (%) de de energía eólica en los principales países hasta el 2008.

⁶ GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). US and China in race to the top of global wind industry. [En línea]. Brussels: El Autor, 2009. <Disponible en: [http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=177&tx_ttnews\[backPid\]=4&cHash=3a1c08c3ac](http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=177&tx_ttnews[backPid]=4&cHash=3a1c08c3ac)> [Consulta: 30 Mar.2009].

Figura 3. Capacidad instalada (%) de los países potencias en energía eólica en 2008

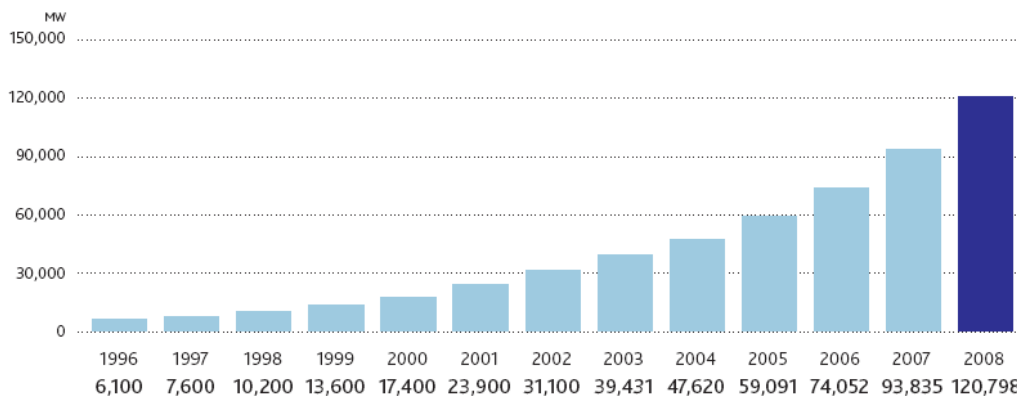


Fuente: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). US and China in race to the top of global wind industry. [En línea]. Brussels: El Autor, 2009. <Disponible en: http://www.gwec.net/fileadmin/documents/PressReleases/PR_stats_annex_table_2nd_feb_final_final.pdf> [Consulta: 30 Mar.2009]

La energía eólica instalada en el mundo ha superado, a 1 de enero 2009, los 120.000 MW, lo que supone un 22% de crecimiento con respecto al año anterior en el que había instalados 94.124 MW; en la figura 4 se muestra la potencia instalada acumulada a nivel mundial desde 1996 hasta 2008⁷.

⁷ Ibid.

Figura 4. Potencia instalada acumulada a nivel mundial. 1996-2008

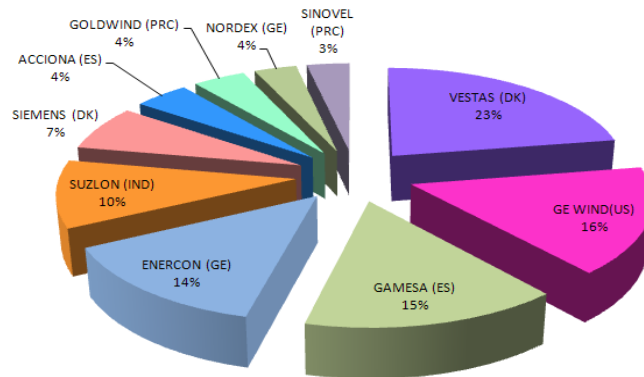


Fuente: GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). US and China in race to the top of global wind industry. [En línea]. Brussels: El Autor, 2009. <Disponible en: http://www.gwec.net/fileadmin/documents/PressReleases/PR_stats_annex_table_2nd_feb_final_final.pdf>

[Consulta: 30 Mar.2009]

Es importante destacar el reparto por fabricantes de energía eólica; según el informe realizado por BTM consult, la situación a finales de 2007 muestra que en este año se obtuvo la mayor instalación de energía eólica. Fueron 19.971 MW instalados que si se suman a la potencia instalada acumulada mundial, llegan a 94.000 MW. La figura 5, muestra el mercado mundial de energía eólica durante ese año, fue dominado por la empresa danesa VESTAS (22.8%), el segundo fabricante fue GE WINDS (16.6%) de EE. UU., y en tercer lugar la industria española GAMESA (15.4%). Otras empresas que comparten el resto del mercado mundial son ENERCON, SUZLON, SIEMENS, ACCIONA (WINDPOWER), entre otras.

Figura 5. Compañías líderes en el mundo de energía eólica.



Fuente: BTM CONSULT APS. International wind energy development world market update 2007. [En línea]. s.l.: El Autor, 2007. p.2. <Disponible en: <http://www.btm.dk>> [consulta: 26 Ene.2009]

2.3 TENDENCIAS DE LA ENERGÍA EÓLICA

El costo de la energía del viento terrestre ha disminuido más del 80% desde inicios de los años 80, cerca de 7centavos de dólar por kWh en los lugares ricos en viento. En algunos mercados, el viento es actualmente competitivo con la generación de energía convencional. En la mayoría de los mercados, sin embargo, debido a los subsidios para las fuentes de energía convencionales, el crecimiento de la energía del viento todavía depende de incentivos económicos. Si el costo completo de las emisiones de carbono fuera incorporado al precio del gas natural y del carbón, el viento terrestre se convertiría en la fuente más barata de electricidad, precisamente ese es el incentivo que requiere la energía eólica para ser competitiva.

Con la creciente preocupación por el cambio climático, la energía del viento está tomando rápidamente una posición central en la nueva economía de la energía. A diferencia de las fuentes convencionales de energía, la producción eléctrica del

viento no emite gases de efecto invernadero asociados al calentamiento global. El viento también ofrece seguridad energética a largo plazo, puesto que es inagotable, distribuido extensamente y libre. Si el actual índice de crecimiento anual del 27% de la capacidad instalada de energía eólica se mantiene, la capacidad total en 2020 alcanzará los 2 millones de MW. Con incentivos económicos agresivos, ese año podría alcanzar los 3 millones de MW, 30 veces la capacidad actual⁸.

Es importante resaltar que para países en donde la generación y atención de la demanda se fundamenta en hidroelectricidad, no se hace necesario la implementación de energías limpias, pero si, al momento de implementar un proyecto en su evaluación económica, se incorporacen los costos e impactos de las emisiones de carbono, en todos los casos sería más competitivas las fuentes de energía limpia. Incluso para el caso de sistemas híbridos Eólico – Diesel afectaría la decisión de periodos de generación menores con plantas diesel.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Los aerogeneradores permiten resolver, desde aplicaciones de pequeña potencia para bombeo de agua o electrificación rural, hasta parques eólicos (instalaciones de gran potencia) conectados a la red eléctrica.

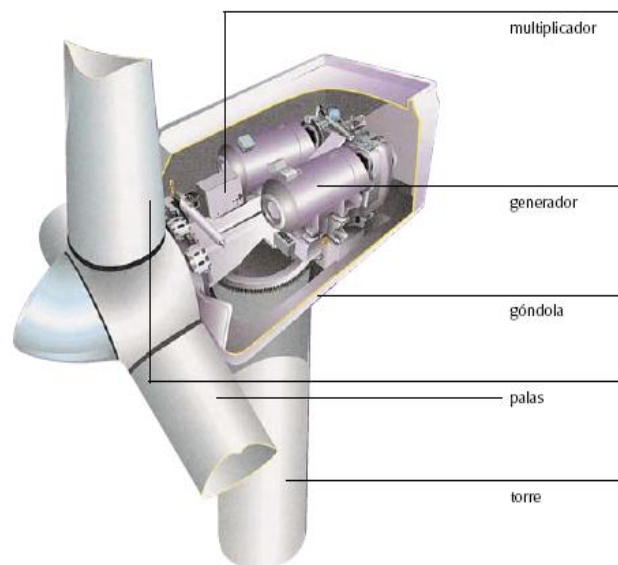
Como se muestra en la figura 6 todas estas máquinas están constituidas por los siguientes elementos básicos: un elemento móvil de captación de energía cinética

⁸ ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA (AEE). Eólica 2008, anuario del sector: analisis y datos. [Documento en formato PDF]. España: El Autor, 2008. p.45.

del viento, denominado rotor, que se acopla a un eje conectado a un generador eléctrico, góndola, torre, cimientos y el sistema de control.

Existen diferentes tipos de turbina, que se clasifican de acuerdo a varios criterios, entre los cuales se encuentra la posición del eje de rotación que puede ser horizontal o vertical. Los aerogeneradores más utilizados son los eje horizontal. A continuación se muestran los componentes con más detalle.

Figura 6. Partes de un Aerogenerador.



Fuente: COMUNIDAD DE MADRID. Aerogenerador. [En línea]. Madrid: El Autor, s.f. <Disponible en: <http://www.madrid.org>> [consulta: 21 Mar.2009]

- Las Palas: Son los elementos del aerogenerador encargados de captar la energía cinética del viento. Es uno de los componentes más críticos de la máquina, ya que en palas de gran longitud, permiten un mejor aprovechamiento de la energía, pero las altas velocidades que se consiguen en los extremos de éstas, llevan al límite la resistencia de los materiales con que están fabricados (normalmente, fibra de vidrio y poliéster).

- El Rotor: Es la parte de la máquina que transforma la energía del viento en energía mecánica.
- Multiplicador: El multiplicador es un conjunto de engranajes que transforman la baja velocidad a la que gira el eje del rotor (entre 20 y 30 RPM) a una velocidad más elevada, que se comunica al eje que hace girar el generador. En algunos casos o tecnologías no se utiliza este componente mecánico, sino electrónica de potencia y convertidores de frecuencia para lograr su objetivo.
- El generador: El objetivo del generador es transformar la energía mecánica procedente del rotor de la máquina en energía eléctrica.
- La góndola: Es la carcasa en el cual se albergan los componentes del aerogenerador⁹.
- Controlador: Se encarga por medio de la electrónica de potencia, mantener el voltaje de salida constante y aumentar ó disminuir la velocidad de giro del aerogenerador conservándolo en valores deseados.

Hay una amplia gama de aerogeneradores, pero los que demuestran mejores características de funcionamiento y mejor rendimiento son los aerogeneradores tripala, con potencias unitarias que oscilan entre los 1.5 MW y los 3 MW, siendo un mercado creciente.

⁹ DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. Denamark. [En línea]. s.p.i. <Disponible en: <http://www.windpower.org>> [consulta: 23 marzo 2009]

2.5 CARACTERISTICAS DE PEQUEÑOS Y MICRO AEROGENERADORES

Los aerogeneradores actuales se pueden clasificar dentro de diferentes familias dependiendo de su tamaño y capacidad de generación. Esta clasificación se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de aerogeneradores de acuerdo a tamaño y potencia

Escala	Diámetro del rotor	Potencia
Micro	Menos de 3 m	50 W a 2kW
Pequeño	De 3 a 12 m	2kW a 40kW
Mediano	De 12 a 45 m	40kW a 999kW
Grande	Superior a 45 m	Superior a 1MW

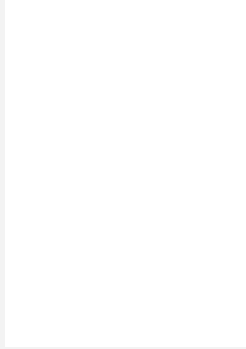
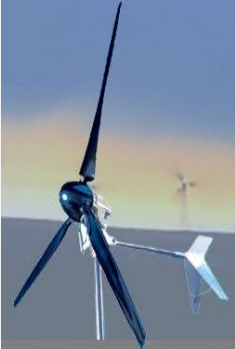
Fuente: Los valores referenciados se tomaron de las diversas casas matrices de los diferentes aerogeneradores. <http://www.windenergy.com>; <http://www.bergey.com>; <http://www.windwandler.de>; <http://pointpowersystems.com>; <http://www.truenorthpower.com>; <http://www.landmark-halle.de>; <http://www.ropatec.com/>; <http://sidilu.com>.

Los pequeños y micro aerogeneradores están en capacidad de operar en condiciones de bajas velocidades de viento.

Como se mencionó anteriormente, en el mercado actual existe una gran variedad de aerogeneradores de diversas especificaciones y rangos de operación. Con el fin de ilustrar la situación de los pequeños y los micro generadores disponibles, a continuación se muestra un pequeño recuento de los últimos desarrollos tecnológicos en este campo en el comercio mundial. Así mismo, se exponen las principales características de cada uno de ellos. Ver tabla 4.

Tabla 4. Características de pequeños y micro aerogeneradores disponibles en el comercio

DISPOSITIVO	AIR-X Module-Southwest windpower, Inc	Whisper H40- Southwest Windpower, Inc.	Whisper H80- Southwest Windpower, Inc	Whisper 175- Southwest Windpower, Inc	Windseeker- Southwest Windpower, Inc	BWC Bergey Windpower Co.	XL.1-
							
DIÁMETRO ROTOR (m)	1.14	2.1	3	5	1.52	2.5	
VELOCIDAD DE ARRANQUE (m/s)	3	3.4	3.1	3.1	2	3	
POTENCIA DE SALIDA	400 W @ 12.5 m/s	900 W @ 12.5 m/s	1000 W @ 10.5 m/s	3200 W @ 12 m/s	500 W @ N.D.	1600 W @ 11 m/s	
RANGO DE VOLTAJE (V)	12, 24, 48 VD	12, 24, 48 CD	12, 24, 36, 48 CD 230 CA	24, 32, 48 CD 240 CA	12, 24, 48 CD	24 DC	
VELOCIDAD MÁXIMA DE OPERACIÓN (m/s)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	54	

DISPOSITIVO	BWC Exel- Bergey Windpower Co. 	WINDuS-MatroW GmbH 	PPS 6 kW-Point Power Systems 	Lakota-True North Power Systems 	WindRotor WRE.030-Rotopatec 	Inclin 6000 neo-Landmark Wind 
DIÁMETRO ROTOR (M)	6.7	1	5	2.09	3.3	4
VELOCIDAD DE ARRANQUE (m/s)	3.4	2	2.5	2.7	3	3.5
POTENCIA DE SALIDA	10000 W @ 13.8 m/s	3500 W @ N.D.	6200 W @ N.D.	1500 W @ 13.4 m/s	3000 W @ 14 m/s	6000 W @ 13 m/s
RANGO DE VOLTAJE (V)	48, 240 CD 240 CA	24, 48 CD 240 CA	N.D.	12, 24, 48 CD	48 DC 115, 230 CA	48 DC 220 AC
VELOCIDAD MÁXIMA DE OPERACIÓN (m/s)	54	N.D	60.4	53.6	75	N.D

Fuente: Los valores referenciados se tomaron de las diversas casas matrices de los diferentes aerogeneradores. <http://www.windenergy.com>; <http://www.bergey.com>; <http://www.windwandler.de>; <http://pointpowersystems.com>; <http://www.truenorthpower.com>; <http://www.landmark-halle.de>; <http://www.ropatec.com/>; <http://sidilu.com>.

2.6 VELOCIDADES Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA DEL VIENTO

La energía eólica se obtiene a partir del movimiento y vibración de las corrientes de aire. La potencia mecánica en el eje del aerogenerador es función de la velocidad del viento, la densidad del aire seco y el área barrida por el rotor. Está representada en la ecuación 1:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P = Potencia Mecánica (Watts)

ρ = Densidad de Aire Seco $\left(\frac{\text{Kgr}}{\text{m}^3}\right)$

v = Velocidad del viento $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

A = Área de barrido del rotor (m^2)

El Alemán Alfred Betz, probó que el valor máximo del coeficiente de potencia es 0.593, o sea que sólo se puede obtener cerca del 60% de la energía cinética del viento en condiciones ideales¹⁰.

Entonces:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot 0,593 \quad \text{Ecuación 2}$$

¹⁰ PIGGOTT, Hugh. Windpower workshop.EE.UU.: British Wind Energy Association; Centre for Alternative Technology Publications, 2000. p.30.

De la anterior ecuación puede intuirse que los parámetros más neurálgicos a la hora de maximizar la potencia mecánica aprovechada por un aerogenerador, son la velocidad del viento (por su relación cúbica) y el diámetro de las aspas, ya que pequeños incrementos de éste último ocasionarán grandes variaciones en el área barrida¹¹.

Para el caso Colombiano los resultados del *Atlas de Viento*, indican que en algunos sectores prevalecen vientos con intensidades de 5 m/s a 10m de altura siendo esta mayor en algunas épocas del año, situación enormemente favorable para la implantación de parques.

Las zonas o departamentos de Colombia donde es más persistente la presencia del viento son; toda la península de la Guajira alcanzando 11 m/s, la Isla de San Andrés, Bolívar y en algunos sectores de Boyacá y los santanderes. El resto del país presenta variaciones dentro del ciclo estacional¹².

Para estudios de energía eólica, los vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s proporcionan una buena alternativa de uso de este tipo de recurso natural para la generación de energía. Sin embargo, debido a las desigualdades de superficie ocasionadas por la orografía y la distribución de tierras y mares, la dirección y la velocidad del viento varían de un lugar a otro y de una época del año a otra.

Los aerogeneradores generalmente son de fabricación europea y con un estándar basado en los vientos Monzónicos que se presentan en Europa, lo que para su

¹¹ BURTON, Op. Cit., p.45.

¹² COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: El Autor, 2006. p.19.

aplicación en América exige algunas variaciones constructivas al presentarse aquí los vientos Alisios, que tienen comportamientos diferentes. Además las condiciones peculiares de La Guajira (temperatura, material particulado que transporta el viento, etc.) hacen que los aerogeneradores deban ser adecuados para un óptimo funcionamiento en dichas condiciones.

En el anexo F, se muestra los mapas de las condiciones de viento promedio anuales a 10 m y 50 m de altura; para el segundo vale la pena aclarar que los valores no son medidos físicamente sino que se obtienen extrapolando datos a partir de los datos a 10 m de altura¹³.

Empresas como ISAGEN actualmente mediante convenios con firmas especializadas como Iberdrola – Ibernova (Iberdrola renovables) realiza la medición de vientos en diferentes puntos del país, especialmente el Departamento de la Guajira, en alturas superiores a los 30 m, con la finalidad de determinar el potencial eólico y capacidades optimizadas de instalación según el sitio de medición del país.

2.7 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LOS AEROGENERADORES.

En esta parte se describe la situación actual de los generadores, la electrónica de potencia empleada en ellos y las estrategias para el control de la potencia más comúnmente utilizadas.

¹³ Ibid., p.19.

2.7.1 Descripción de las diferentes topologías de los aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden operar a velocidad fija o variable, a continuación se ilustran de manera somera las características más relevantes de cada uno de ellos.

2.7.1.1 Aerogeneradores de velocidad fija

A comienzos de 1990 la mayoría de los aerogeneradores instalados funcionaban a velocidad fija. Esto significa que independientemente de la velocidad del viento, la velocidad del rotor de la turbina eólica era fija, establecida por la frecuencia de la red, la relación de transmisión y el diseño del generador.

Estos aerogeneradores estaban equipados con un generador de inducción (jaula de ardilla o rotor devanado) conectado directamente con la red, un arrancador suave y un banco de condensadores para reducir la compensación de potencia reactiva. Por criterios de diseño sólo se lograba la máxima eficiencia a partir de una determinada velocidad del viento. Con el fin de aumentar la producción de energía, algunos generadores de velocidad fija contaban con dos devanados: uno se utilizaba para bajas velocidades de viento (normalmente 8 polos) y el otro en medio y altas velocidades (normalmente 6-4 polos)¹⁴.

Los aerogeneradores de velocidad fija tienen la ventaja de ser simples, robustos, fiables y relativamente de bajo costo. Sus desventajas son un incontrolable consumo de potencia reactiva, tensión mecánica y limitado control de la calidad de

¹⁴ ACKERMANN, Op. Cit., p.53.

potencia. Debido a su velocidad establecida de operación, todas las fluctuaciones en la velocidad del viento son transmitidas al par mecánico y, luego, se transmiten a la red de energía eléctrica. En el caso de la debilidad de las redes, las fluctuaciones de energía pueden dar lugar a grandes fluctuaciones de voltaje que, a su vez, dará lugar a importantes pérdidas en la línea. Actualmente la operación a velocidad fija está en desuso.

2.7.1.2 Aerogeneradores de Velocidad Variable

Durante los últimos años la operación a velocidad variable de aerogeneradores, es el tipo de operación más común entre los aerogeneradores instalados.

Los aerogeneradores de velocidad variable están diseñados para lograr la máxima eficiencia aerodinámica en una amplia gama de velocidades del viento. Con una velocidad variable de operación se ha hecho posible adaptar continuamente (acelerar o desacelerar) la velocidad de rotación de la turbina a la velocidad del viento. De esta forma, la velocidad específica se mantiene constante en un valor predefinido que corresponde al máximo coeficiente de potencia.

Contrario al sistema de velocidad fija, el sistema de velocidad variable mantiene el torque del generador prácticamente constante y las variaciones del viento son absorbidas por los cambios en la velocidad del generador.

El sistema eléctrico de los aerogeneradores de velocidad variable es más complejo que el de los de velocidad fija. Estos están generalmente equipados con un generador de inducción o síncrono y conectados a la red a través de un inversor de potencia. La potencia del inversor controla la velocidad del generador, es decir, las fluctuaciones de potencia causadas por las variaciones del viento son absorbidas principalmente por los cambios en la velocidad del rotor del generador y, por consiguiente, en la velocidad del rotor de la turbina eólica.

Las ventajas de los aerogeneradores a velocidad variable son un incremento de la captura de energía, mejora en la calidad de la potencia y una reducción de tensión mecánica en la turbina eólica. Las desventajas son las pérdidas en la electrónica de potencia, la utilización de un mayor número de componentes y el aumento del costo del equipo a causa de la electrónica de potencia.

2.7.2 Descripción de los conceptos de control de potencia en los aerogeneradores

Todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia. Existen diferentes formas de control de las fuerzas aerodinámicas en el rotor de la turbina, para limitar la potencia de vientos muy fuertes, a fin de evitar daños a la turbina eólica.

El más simple, más robusto y más barato método de control es el *Stall Control* ó control pasivo, donde las palas están unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor. De este modo, la potencia aerodinámica en las palas es limitada. Este método posee baja regulación aerodinámica causada por las pocas fluctuaciones de potencia.

Algunos inconvenientes del método son la baja eficiencia a bajas velocidades del viento, el hecho de no arrancar a máximas variaciones de potencia en estado estacionario debido a las variaciones en la densidad del aire y en la frecuencia de la red.

Otro tipo de control es el *Pitch Control* ó control activo, este funciona con un controlador electrónico de la turbina que comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando la turbina alcanza un valor demasiado alto en

velocidad, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. Así pues, las palas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso).

En general, las ventajas de este tipo de control son el buen control de potencia, con la ayuda en el arranque y en el paro de emergencia. Desde el punto de vista eléctrico, el buen control de potencia significa que a altas velocidades de viento el valor medio de la potencia de salida, se mantiene cerca de la potencia nominal del generador. Algunas desventajas son el exceso de complejidad derivados del mecanismo de ángulo de paso y las altas fluctuaciones de potencia a altas velocidades de viento. La potencia instantánea, a causa de ráfagas y la velocidad limitada del mecanismo de regulación por ángulo, fluctúan en torno a la media de los valores nominales de la potencia.

El tercer tipo de control es el *Active Stall Control* ó control de regulación activa por pérdida aerodinámica. Como su nombre lo indica, la pérdida de sustentación de la pala está controlada por la inclinación de las palas. A bajas velocidades de viento es similar al control de regulación por cambio del ángulo de paso o pitch-control, con el fin de lograr la máxima eficiencia. A altas velocidades del viento las palas entran una pérdida de sustentación situándose en la dirección opuesta al pitch-control. La regulación activa tiene la ventaja de ser capaz de compensar las variaciones en la densidad del aire. La combinación con el mecanismo pitch hace

que sea más fácil de llevar a cabo paradas de emergencia y de poner en marcha la turbina eólica¹⁵.

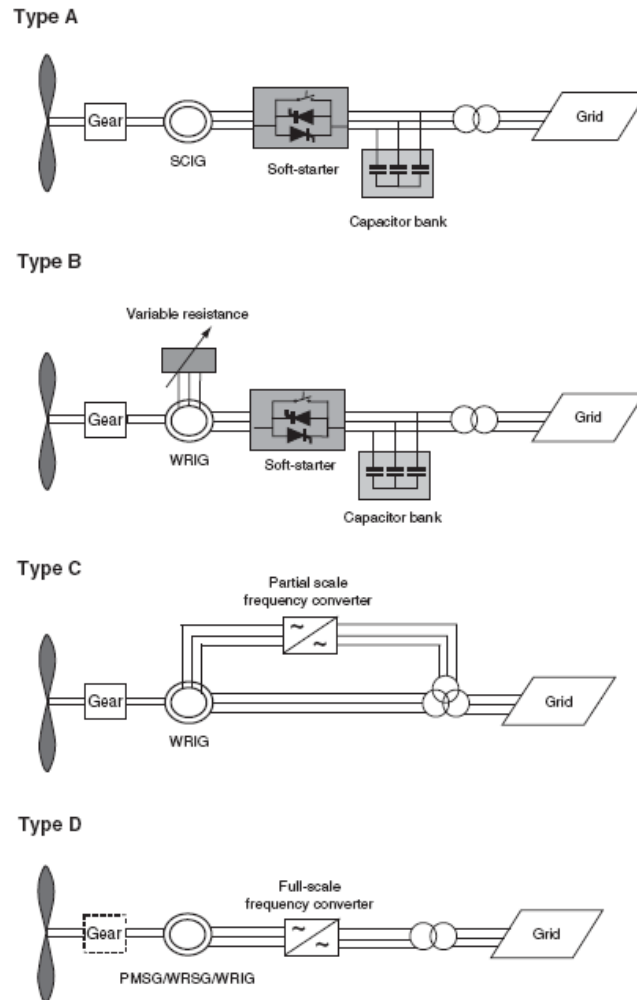
2.7.3 Estado de Arte de los Generadores

Las configuraciones que se aplican comúnmente en los aerogeneradores se clasifican, por su capacidad para controlar la velocidad y por el tipo de control de potencia que utilizan¹⁶. Ver figura 7.

¹⁵ Ibid., p.33.

¹⁶ HANSEN, L. H. y otros. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines. Dinamarca: Riso National Laboratory, 2001. p.10.

Figura 7. Configuraciones típicas de los aerogeneradores



Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.56.

La línea punteada en el tipo D significa que puede o no puede tener una caja multiplicadora.

En la tabla 5, se indican los diferentes tipos de configuraciones en los aerogeneradores, teniendo en cuenta ambos criterios (de control de velocidad y control de potencia). Cada combinación de estos dos criterios recibe una etiqueta, por ejemplo, tipo A0 denota operación a velocidad fija con control pasivo para la

turbina. Las zonas grises en la tabla indican las combinaciones que no se utilizan en la industria de turbinas eólicas, hoy (por ejemplo: Tipo B0).

Tabla 5. Configuraciones en Aerogeneradores.

Control de Velocidad		Control de Potencia		
		Stall	Pitch	Active Stall
Velocidad Fija	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.57.

En este capítulo se presentó la historia de la energía eólica, se muestra la situación actual, especificando los principales mercados y países potencias en el desarrollo de esta tecnología. Además se mostró que tanto potencial y desarrollo existe en Colombia. También, se mencionaron los diferentes tipos de control y configuraciones que se aplican en los aerogeneradores. En el capítulo siguiente continua la descripción de la energía solar que es otra importante alternativa para las zonas aisladas y que a nivel mundial tiene un gran auge dentro de las renovables.

3. ENERGÍA SOLAR

En este capítulo se describen los principales aspectos relacionado con la energía solar, haciendo especial énfasis en la energía solar Fotovoltaica (FV). Inicialmente se describe un poco la historia, la situación actual, los principales componentes y ventajas de un sistema FV. Posteriormente, se analiza el potencial de energía FV en Colombia y el mundo, y por último se presentan las diferentes tecnologías que existen, en cuanto a la elaboración de las celdas FV.

La idea de utilizar y aprovechar la energía solar es muy antigua, pero el bajo nivel de recursos de los que disponía el hombre le impidió usarla de forma efectiva durante mucho tiempo. No obstante los griegos (2000 A.C.) ya utilizaban el calor del sol para calentar sus viviendas dándoles la ubicación geográfica adecuada; Arquímedes también la utilizó con espejos solares para incendiar la flota enemiga que atacaba su ciudad.

El aprovechamiento de la energía solar para generar energía eléctrica de manera directa, sólo fue posible a través del descubrimiento de Alexandre Edmond Becquerel del efecto fotovoltaico en 1939, y es hasta 1955 cuando se comercializa el primer producto fotovoltaico para generación de electricidad¹⁷.

La energía solar se constituye en la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance, debido a que es la mayor fuente primaria de luz y calor en la tierra.

¹⁷ ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (ASIF). Historia de la energía solar fotovoltaica. [En línea]. Madrid: El Autor, 2008. <Disponible en: http://www.asif.org/files/Historia%20FV_web_resumida_2008.pdf> [consulta: 04 Agos. 2008].

La energía solar se puede transformar en calor o en electricidad. La primera se llama conversión fototérmica ó térmica y la segunda conversión fotovoltaica.

La conversión de la energía solar es ampliamente considerada como una de las más prometedoras tecnologías de energía renovable, la cual tiene el potencial para el suministro de electricidad a la población mundial.

La energía solar llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (se define, como la energía producida por reacciones nucleares al interior del sol, que son transmitidas en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio) que al llegar a la tierra producen energía.

La radiación solar que recibe la tierra oscila entre los 1300 y los 1400 W/m² aproximadamente. Estos valores pueden variar dependiendo de las condiciones climatológicas, que a su vez dependen de la ubicación geográfica (latitud y longitud) y del período del año.

3.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA SOLAR

Hoy en día los sistemas de generación de electricidad con energía solar más difundidos son: La *conversión fotovoltaica*, y la *térmica* o producción de vapor para generar electricidad.

La energía solar fotovoltaica (FV) consiste en la generación de energía eléctrica directamente del sol, empleando tecnología de semiconductores. El efecto fotoeléctrico es la base de la producción de energía eléctrica por radiación solar y ocurre cuando un material es irradiado con energía luminosa y genera corriente eléctrica. Una aplicación del efecto fotoeléctrico para generar electricidad es utilizar celdas fotovoltaicas, también llamadas celdas solares las cuales captan los rayos del sol y los transforman en energía eléctrica. Existen fundamentalmente dos tipos de aplicaciones de la energía solar FV: instalaciones *aisladas* de la red eléctrica y centrales de generación *conectadas* a la red.

Las plantas de energía solar térmica, o de concentración solar producen electricidad mediante la conversión de la energía del sol en calor a altas temperaturas, utilizando diferentes tipos de concentradores de rayos solares. Se componen de dos partes: una que recolecta la energía del sol y la convierte en calor, y otra que transforma el calor en electricidad. A diferencia del sistema solar FV, en este se usan los rayos solares para generar calor, normalmente para calentar el agua de una vivienda, una piscina, etc.

La energía solar FV es la más difundida y en la actualidad es de gran uso en diferentes países del mundo.

A finales de 2007, la capacidad acumulada instalada de los sistemas FV solares de todo el mundo superó los 9.200 MW. Esta cifra contrasta con los 1.200 MW existentes a finales del año 2000¹⁸.

La competencia entre los principales fabricantes se ha intensificado cada vez más, con la aparición de nuevos actores en el mercado al revelarse el potencial de la energía FV. La industria fotovoltaica mundial, en particular en Europa, EE. UU., China y Japón, está realizando fuertes inversiones en nuevas instalaciones de producción y tecnologías. A la vez, el apoyo político al desarrollo de la electricidad solar, ha promovido la implantación de marcos promocionales de largo alcance en numerosos países, en especial en Alemania, España, Italia, Francia, Corea del Sur, EE. UU., etc.

¹⁸ ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE. Solar generation V – 2008: Electricidad solar para más de mil millones de personas y dos millones de puestos de trabajo para el año 2020. [En línea]. Bélgica: Patricia Philbin, 2008. p.8. <Disponible en: http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/biblioteca/1920081625511_Solar-Generation-V-2008.pdf> [consulta: 9 Abr. 2009]

Para el caso de Colombia no se cuenta con grandes usos de esta tecnología, la aplicación se realiza básicamente para alimentación de sistemas de comunicaciones ubicados en zonas de difícil acceso o donde las redes de distribución no llegan y no se cuenta con un inventario claro de su instalación; también es preciso resaltar que no existe ninguna fuente de generación FV conectada a la red, más adelante en el numeral 3.4 se profundiza al respecto.

3.2 ENERGÍA SOLAR FV

“Fotovoltaico” es el resultado de la unión de dos palabras, “foto”, que significa luz, y “voltaico”, que significa electricidad. “Tecnología fotovoltaica” es el término que se emplea para describir el sistema físico que convierte la energía solar en energía utilizable, generando electricidad a partir de la luz. En el corazón de la tecnología FV reside un material semiconductor que puede adaptarse para liberar electrones, las partículas con carga negativa que constituyen la base de la electricidad. El material semiconductor más común que se emplea en las celdas fotovoltaicas es el silicio, un elemento que se encuentra habitualmente en la arena. Su disponibilidad como materia prima no tiene límites; el silicio es el segundo material más abundante en la masa terrestre.

Todas las células FV tienen dos capas de semiconductores, una con carga positiva y otra con carga negativa. Cuando brilla la luz en el semiconductor, el campo eléctrico presente en la unión entre estas dos capas hace que fluya la electricidad, generando una corriente continua. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz, mayor será el flujo de electricidad.

Por lo tanto, un sistema FV no necesita luz solar brillante para funcionar. También puede generar electricidad en días nublados. Debido a la reflexión de la luz solar,

los días ligeramente nublados pueden incluso hacer que se genere más energía que en los días con el cielo totalmente despejado¹⁹.

Los componentes de un sistema FV dependen del tipo de aplicación que se requiera: puede ser conectada o no a la red, y de las características de la instalación.

Una instalación fotovoltaica aislada está formada por los equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica²⁰. En la figura 8 se aprecia el esquema básico con cada uno de los siguientes elementos:

- **Celdas fotovoltaicas:** Dispositivo dónde se produce la conversión fotovoltaica, las más empleadas son las realizadas con silicio cristalino. La incidencia de la radiación luminosa sobre la celda crea una diferencia de potencial y una corriente aprovechable. Fabricadas a partir del silicio, las celdas fotovoltaicas cobraron auge a partir de los años 50, cuando comenzaron a ser utilizadas para el abastecimiento energético de los satélites.
- **Placas fotovoltaicas:** Son un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí, que generan electricidad en corriente continua. Para su mejor aprovechamiento se busca orientarlas (teniendo en cuenta la ubicación y latitud) con el fin de obtener un mayor rendimiento.
- **Regulador de carga:** Tiene por función proteger a la batería contra las sobrecargas y contra las descargas. Además se emplea para proteger a las

¹⁹ Ibid., p.15.

²⁰ ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE ENERGÍAS RENOVABLES (APPA). Energías renovables. [En línea]. España: El Autor, 2005. <Disponible en: <http://www.appa.es/03renovables04/03renovables1-4-7.htm>> [Consulta: 06 Sep. 2008]

cargas en condiciones extremas de operación, y para proporcionar información al usuario.

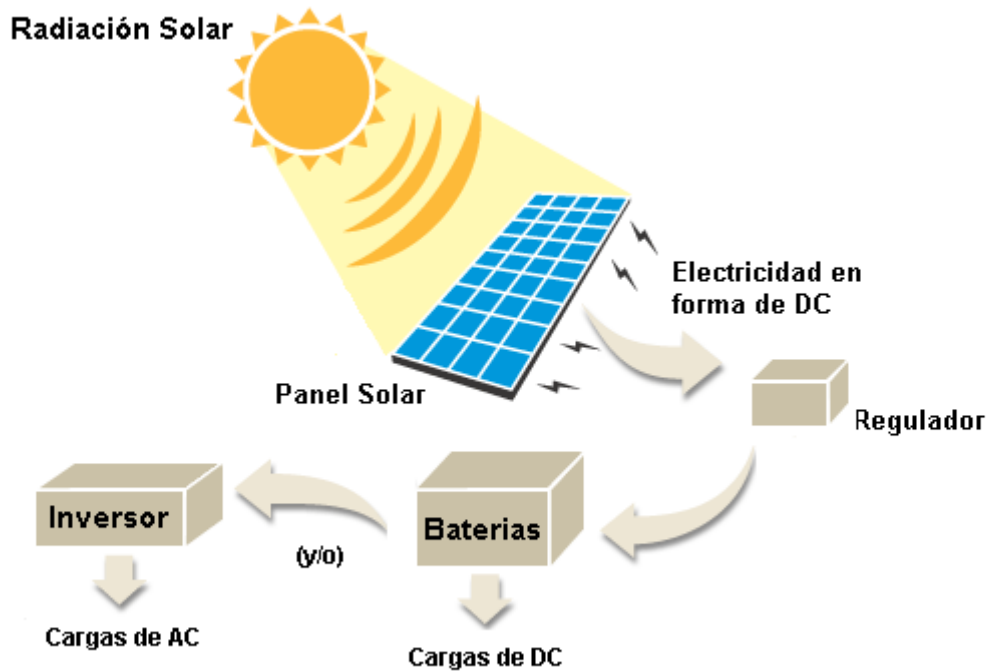
- **Baterías:** Almacenan la energía eléctrica producida durante las horas de radiación solar; permitiendo y garantizando suficiente autonomía para los períodos en los que el sistema fotovoltaico no produce electricidad.
- **Inversor:** Transforma la corriente continua (de 12, 24 o 48 V) generada por las placas fotovoltaicas y acumulada en las baterías a corriente alterna (a 120 V y 50/60 Hz).

El dimensionamiento de una instalación aislada requiere disponer de información relativa al consumo previsto de energía del lugar que se ha de electrificar y de la disponibilidad media de radiación solar a lo largo del año.

Con respecto, a los elementos de los sistemas conectados a la red, los módulos fotovoltaicos son los mismos que se emplean en instalaciones aisladas. Debido a que la energía producida va directamente a la red, la diferencia fundamental de estas instalaciones radica en la ausencia de acumuladores (baterías) y de regulador de carga. Respecto al tipo de inversor empleado, normalmente se usan aparatos de mayor potencia que incluyen controles de fases para adecuar la corriente alterna a la que circula por la red²¹.

²¹ RETSCREEN INTERNATIONAL. Clean energy decision support centre; Clean energy project analysis: photovoltaic project analysis chapter. [En línea]. Canadá. Retscreen, 2004. <Disponible en: <http://www.etscreen.net/ang/home.php>> [consulta: 10 Sep. 2008]

Figura 8 . Elementos de un Sistema FV básico



Fuente: SADOUN SOLAR SALES. Solar & Wind Power Generation Products. [En línea]. Ohio: El Autor, 2008. <Disponible en: www.sadoun.com/solar/index.htm> [consulta: 10 abril 2009]

Para muchas aplicaciones, la energía solar FV ofrece ventajas únicas sobre las fuentes convencionales de energía, por ejemplo en aquellas partes donde el acceso es difícil y los costos de entrega de los combustibles son altos, la fiabilidad y el bajo mantenimiento que requieren los sistemas FV ofrecen una solución muy competitiva a las necesidades energéticas²².

²² RETSCREEN INTERNATIONAL. Análisis de proyectos fotovoltaicos: curso de análisis de proyectos de energía limpia. [En línea]. Canadá: Retscreen, 2004. <Disponible en: http://www.etscreen.net/es/t_training.php> [consulta: 10 Sep. 2008]

Ventajas

- No produce ruido, emisiones nocivas ni gases contaminantes.
- No consume combustible.
- Sólo requiere un mantenimiento mínimo para garantizar el funcionamiento del sistema.
- Resistente a condiciones climáticas extremas.
- Tiene una vida útil superior a 20 años.
- No hay piezas móviles susceptibles de desgaste o rotura.
- Se pueden incorporar nuevos módulos e instalar rápidamente en cualquier parte²³

3.3 POTENCIAL DE LA ENERGÍA FV EN EL MUNDO

En la actualidad las aplicaciones de la energía solar FV para generación de electricidad interconectada a la red son reducidas por su poca participación y desarrollo, se presenta como una alternativa, por la magnitud en capacidad instalada que pueden alcanzar sus instalaciones.

Un gran número de países han introducido elementos de presión para que los generadores de electricidad incrementen dentro de su servicio fuentes de energía renovable. Tal es el caso en países como España, Alemania y Japón, las

²³ MADRID SOLAR, Op. Cit., p.40.

compañías de distribución eléctrica están obligadas por ley a comprar la energía inyectada a su red por centrales FV.

Cabe resaltar que en diciembre de 2008 se inauguró en Portugal, la mayor central de energía solar del mundo, en un área de 250 hectáreas, y tiene 262.000 paneles solares fotovoltaicos con una capacidad instalada de 46.41 MW²⁴.

En gran parte de Europa, actualmente se tiene un modelo que es conocido como huerta solar, que consiste en la agrupación de varias instalaciones de distintos propietarios. Por ejemplo en España algunas de las instalaciones tienen una potencia hasta de 100 kW, en estos momentos hay conectados cerca de 57,7 MW, de los cuales 42,5 MW están conectados a la red y pueden vender su electricidad al mercado y 15,2 MW están aislados. Estas instalaciones pueden ser fijas o con seguimiento*.

La potencia total instalada a finales de 2006 en Alemania (3.031 MW), Japón (1.812 MW) y en España (103 MW).

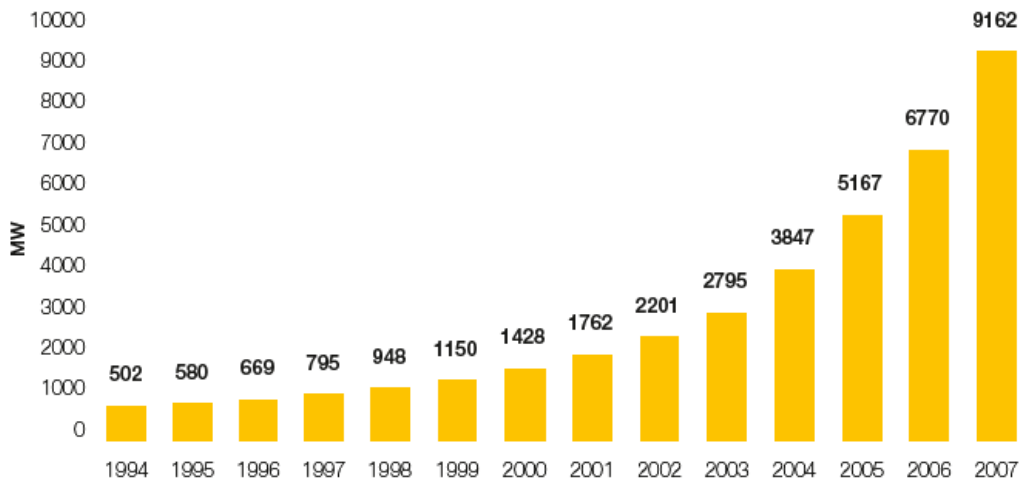
A finales de 2007, la capacidad acumulativa instalada de los sistemas fotovoltaicos solares de todo el mundo supero la cifra de 9200 MW; este valor contrasta con los 1200 MW de finales del año 2000. La figura 9, muestra el crecimiento que ha tenido la energía solar FV a nivel mundial.

²⁴ ENERGÍAS RENOVABLES. Mitsubishi Corporation compra a Acciona el 34% de la mayor planta fotovoltaica del mundo. En: Energías Renovables el periodismo de las energías limpias. [En línea]. s.l: El Autor, 2009. <Disponible en: <http://www.energiasrenovables.com/paginas/Contenidosecciones.asp?ID=15&Cod=16366&Tipo=&Nombre=Solar%20fotovoltaica>> [Consulta: 12 Mar .2009]

* Estructuras que se mueven siguiendo el recorrido del sol para maximizar la generación de electricidad.

El objetivo previsto para la energía solar FV para el año 2010 en Japón es alcanzar 4820 MW; EE. UU. 2140 MW; Unión Europea 3000 MW y el resto del mundo 1200 MW²⁵.

Figura 9. Capacidad FV acumulada mundial



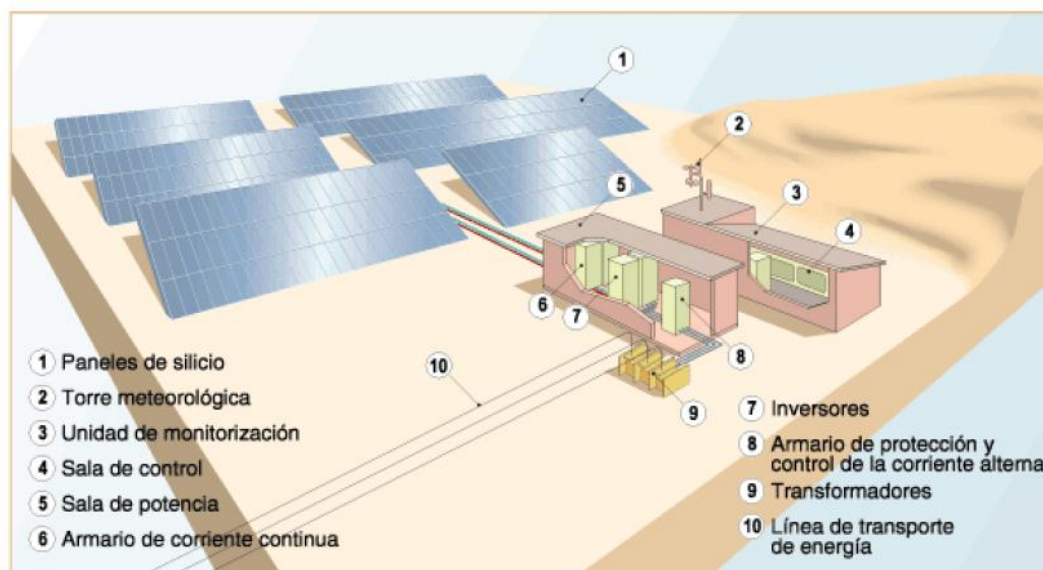
Fuente: ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE. Solar generation V – 2008: Electricidad solar para más de mil millones de personas y dos millones de puestos de trabajo para el año 2020. [En línea]. Bélgica: Patricia Philbin, 2008. p.24. <Disponible en: http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/biblioteca/1920081625511_Solar-Generation-V-2008.pdf> [consulta: 1 May. 2009]

²⁵ ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE, Op. Cit., p.76.

3.3.1 Centrales de energía solar FV

Una central solar FV, básicamente es la agrupación de instalaciones solares FV instaladas en un mismo lugar y conectadas a la red eléctrica para la venta de toda la energía generada a la compañía eléctrica establecida (ver figura 10). Consta de un conjunto de elementos que son: el generador solar (paneles FV), regulador de carga, inversor, acumuladores y todos los sistemas necesarios para la correcta generación de la energía eléctrica, pudiendo prescindir de uno o algunos de estos, teniendo en cuenta el tipo, tamaño de la carga a alimentar y el lugar de la instalación.

Figura 10. Esquema básico de una central FV



Fuente: ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA UNESA. [En línea] España: El Autor, 2009. <Disponible en: <http://www.unesa.es/index.html>> [consulta: 14 Sep.2008]

Las principales centrales fotovoltaicas del mundo se encuentran dentro de Europa, y más concretamente, en Alemania.

En la actualidad, muchos de los países intentan romper una marca mundial en cuanto a la energía solar FV. En la mayoría de regiones de Europa operan

centrales FV, por ejemplo en Erlasee (Alemania) se cuenta con una central de 12 MW, en España el mayor parque solar fotovoltaico, tiene una potencia nominal instalada de 23 MW y una producción anual de 44 MWh, el equivalente al consumo de 135.000 familias; y hasta diciembre de 2008 la mayor planta FV del mundo, se encontraba ubicada en Amareleja, Portugal (ver figura 11) con 46 MW pico de potencia y una producción anual de 93 millones de kWh, ocupa una superficie de 250 hectáreas y consta de 262080 módulos fotovoltaicos; es la mayor central conectada a la red en el mundo y evitará la emisión de 89.383 toneladas anuales de dióxido de carbono (CO_2) en centrales de carbón²⁶.

Figura 11. Imagen real de la central FV más grande del mundo. Ubicada en Portugal.



Fuente: PEREIRA LOBITO. Galeria. [En línea]. Portugal: El Autor, 2008. <Disponible en: <http://www.flickr.com/photos/lobitopereira/2278731599/>> [consulta: 1 May. 2009]

²⁶ ENERGIAS RENOVABLES, Op. Cit.

Para tener una idea del tamaño, cada panel FV está formado por 104 módulos; cada modulo mide aproximadamente $1 \times 0.8 \text{m}$. Lo cual da un área de 83.2m^2 para cada panel FV.

3.4 POTENCIAL DE LA ENERGÍA FV EN COLOMBIA

En Colombia actualmente, no se cuenta con esta tecnología incorporada al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Influye en esto el desconocimiento en la aplicación de la tecnología a gran escala y los altos costos, sin embargo existen casos aislados en ZNI, para uso doméstico y en telecomunicaciones principalmente.

Actualmente se cuenta con el atlas de radiación solar el cual contiene la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia y además, es de gran importancia ya que brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país.

El conocimiento de la distribución espacial del potencial energético solar es necesario porque facilita la identificación de regiones estratégicas en donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas.

Sobre la mayor parte del territorio Colombiano la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4.0 y 4.5 kWh/m^2 por día, especialmente sobre la Amazonía, la Orinoquia, sectores del centro y sur de la región Pacífica y gran

parte de la región Andina. Colombia debido a su posición geográfica es favorecida con una gran disponibilidad del recurso solar²⁷.

En la tabla 6, se muestra una aproximación de la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones.

Tabla 6. Disponibilidad de energía solar por regiones

REGIÓN	kW/h/m ² /año
Guajira	2.190
Costa Atlántica	1.825
Orinoquia	1.643
Amazonia	1.551
Andina	1.643
Costa Pacífica	1.278

Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME) / INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Atlas de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2005. p.20. <Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>> [consulta: 12 Ene. 2009]

Las zonas que reciben mayor intensidad de radiación solar global en Colombia, entre 4.5 y 6.0 kWh/m² por día, son: región Caribe, nororiente de la Orinoquia y sectores de los departamentos de Cauca, Huila, Valle, Tolima, Caldas, Boyacá,

²⁷ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME) / INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Atlas de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2005. p.19. <Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>> [consulta: 12 Ene. 2009]

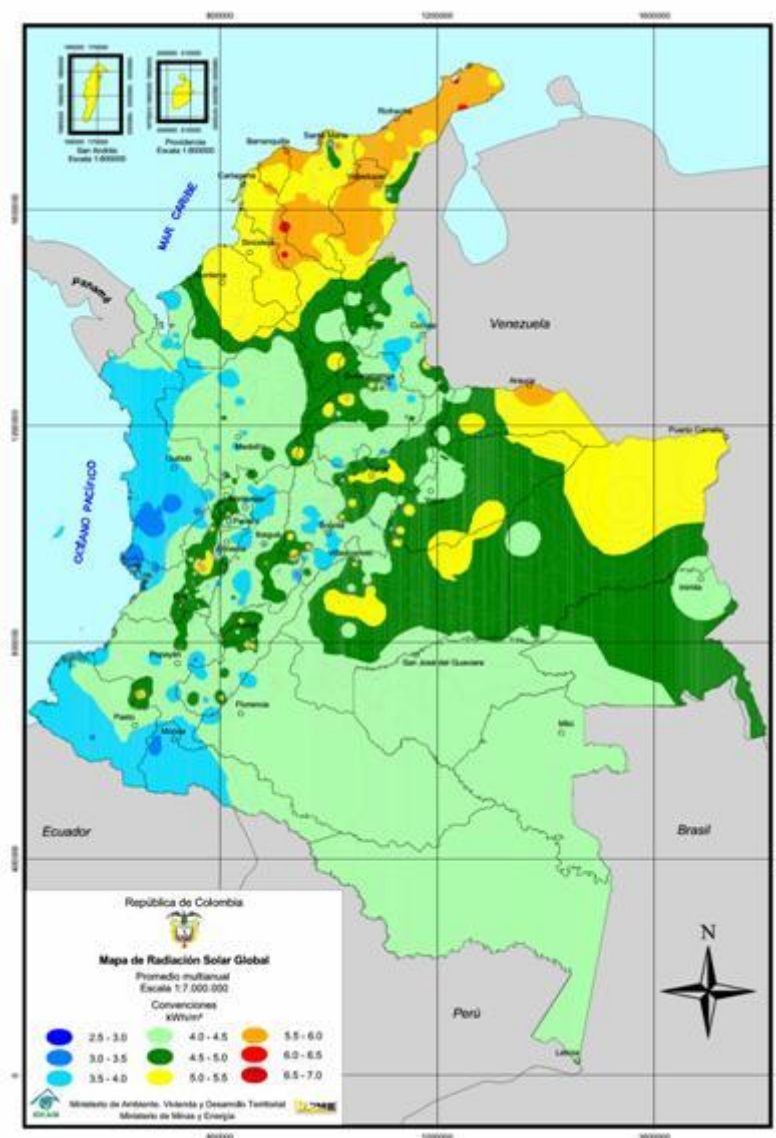
Santanderes, Antioquia y las Islas de San Andrés y Providencia. Los valores más altos (entre 5.5 y 6.0 kWh/m² por día) se presentan en el departamento de La Guajira, norte y sur del Magdalena, norte de Cesar y reducidos sectores de Atlántico y Bolívar.

Las zonas con menor intensidad de radiación solar global en Colombia, menores a 4.0 kWh/m² por día, se presentan en sectores de Chocó, Nariño, Putumayo, Caquetá, Cauca, Tolima, Eje Cafetero, Cundinamarca, Antioquia y Santanderes. Los valores más bajos (entre 3.0 y 3.5 kWh/m² por día) se presentan al sur del departamento de Chocó, Altiplano Nariñense, occidente de Putumayo y pequeños sectores de Cauca, Tolima y Santander²⁸.

En la figura 12, se muestra el promedio en kWh/m² de la radiación solar global acumulada en el día, que incide sobre el territorio colombiano. El valor de la energía corresponde al valor agregado de los kWh que en promedio inciden durante el día sobre un metro cuadrado. Se aprecia el comportamiento de mayores promedios en el norte del país y los menores hacia el occidente y suroccidente.

²⁸ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), Energías renovables: descripción, tecnologías y usos finales, Op. Cit.

Figura 12. Distribución espacial de la Radiación Global en Colombia, promedio multianual



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME) / INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Atlas de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2005. p.19. <Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>> [consulta: 18 Ene. 2009]

3.5 TECNOLOGIA DE LAS CELDAS FV

Los componentes más importantes de un sistema FV son las *celdas*, que constituyen los bloques de construcción básicos de la unidad y se encargan de recoger la luz del sol; los *módulos*, que unen grandes números de celdas en una unidad; y en algunas ocasiones, los *inversores*, que se usan para convertir la electricidad generada en una forma adecuada para el uso diario.

Generalmente, las celdas FV se componen básicamente de silicio en un estado muy puro, denominado silicio grado semiconductor. La cadena industrial parte del mineral de cuarzo, del cual se extrae el silicio; este se refina hasta obtener polisilicio, que se presenta en pequeñas bolitas formadas por silicio grado semiconductor. A continuación se forman lingotes de polisilicio, es decir barras de silicio con una estructura cristalina determinada. El siguiente paso es la obtención de obleas, resultantes de cortar los lingotes de silicio en finas “rodajas”. Con estas obleas se fabrican las celdas solares fotovoltaicas, capaces de producir electricidad y que finalmente se agrupan y empaquetan en los paneles solares, que son las unidades comerciales de producción de energía solar fotovoltaica.

La mayoría de las celdas producidas hasta ahora (el 90% en 2007) son de silicio cristalino, aunque en los planes futuros se contempla que la tecnología de capa delgada basada en silicio y otros materiales va a acaparar una cuota mucho mayor del mercado de la energía FV. Esta tecnología ofrece varias ventajas, como su bajo consumo de material, poco peso, y aspecto uniforme.

Haciendo una comparación entre las tecnologías utilizadas para las energías alternativas, la medida más importante a considerar es el costo por kWh entregado. En la energía FV este costo depende principalmente de dos

parámetros, la eficiencia de la celda FV y el costo por kWh. Estos dos parámetros indican la competencia económica de la tecnología FV en el mercado²⁹.

La eficiencia de la celda FV, se define como:

$$\eta = \frac{\text{potencia eléctrica producida}}{\text{la energía solar que incide en la celda}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Continuos esfuerzos para desarrollar celdas de mayor eficiencia y a un menor costo, han dado lugar a diversos tipos de tecnologías FV disponibles hoy en día en el mercado, en términos de la eficiencia y el costo de la celda.

Los principales tipos son mostrados a continuación:

3.5.1 Silicio monocristalino

El silicio monocristalino, es el material más utilizado en las celdas y ha sido el gran fuerte de la industria. En el método más común de producción de este material, la materia prima de silicio es fundida y depurada en un crisol (Horno).

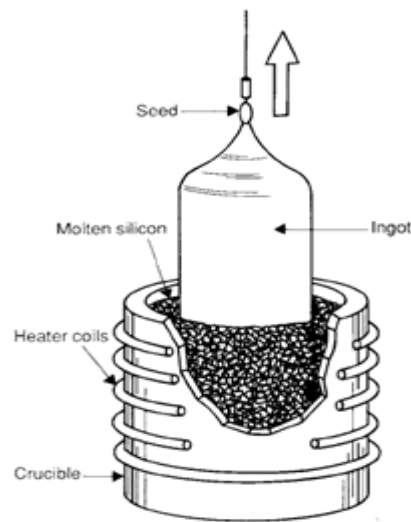
Una semilla de cristal es colocada en el líquido y se extrae el silicio lentamente, dando como resultado un sólido lingote cilíndrico monocristalino (ver figura 13). Cuanto más finos sean los discos, menos silicio se necesitará en cada celda solar y, por lo tanto, más bajo será el costo. El espesor medio de las obleas se ha reducido de 0,32 mm en 2003 a 0,17 mm en 2008. En el mismo periodo, el rendimiento medio ha aumentado del 14% al 16%. El objetivo para el año 2010 es

²⁹ PATEL, Mukund R. Wind and solar power systems. [Documento en formato PDF]. New York: CRC Press LLC, 1999. p.143.

reducir el espesor de las obleas a 0,15 mm y aumentar a la vez el rendimiento hasta una media del 16,5%.

Desafortunadamente durante, el corte de los discos se pierde una cantidad considerable de silicio. En la figura 13 se muestra la elaboración del lingote monocristalino.

Figura 13. Elaboración del lingote monocristalino



Fuente: PATEL, Mukund R. Wind and solar power systems. [Documento en formato PDF]. New York: CRC Press LLC, 1999. Cap.3, p.43.

3.5.2 Silicio policristalino y semicristalino

Este es relativamente un proceso rápido y de bajo costo, para la fabricación de las celdas de espesor cristalino. En lugar de extraer las semillas monocristalinas, los discos policristalinos son realizados en un proceso de moldeo, en el cual el silicio fundido es vertido en un molde y se deja asentar. En el proceso, se forman múltiples cristales, luego se cortan en discos. La eficiencia es menor comparada con las celdas monocristalinas, por lo tanto el costo de fabricación de las policristalinas se reduce ya que son hechas por moldeo, lo que da una disminución

en el costo por kWh. En este proceso también hay pérdidas de silicio durante el cortado.

3.5.3 LÁMINA DELGADA

Los módulos de lámina delgada, se construyen depositando una pequeña cantidad de silicio o cualquier otro material de lámina delgada (cobre, indio, arseniuro de galio) directamente sobre el vidrio, acero inoxidable u otros materiales compatibles con el sustrato que son de bajo costo; esta tecnología utiliza menor cantidad de material por área cuadrada de la celda, por lo tanto, es más barato el kWh, Lo que le reporta una ventaja en precios que actualmente se ve contrarrestada por unos índices de rendimiento considerablemente inferiores.

En la actualidad hay tres tipos de módulos de capa delgada disponibles en el mercado. Se fabrican a partir de silicio amorfo (Si-a), diseleniuro de cobre e indio (CIS, CIGS) y telurio de cadmio (CdTe). Todos ellos tienen capas activas en la gama de espesores por debajo de unos pocos micrones. Así se consigue mayor automatización una vez que se alcanza un determinado volumen de producción, permitiendo simultáneamente un enfoque más integrado en la construcción de los módulos. El proceso es menos intensivo en mano de obra en comparación con el montaje de módulos cristalinos, en el que había que interconectar las celdas individuales. Una escasez temporal de silicio ha brindado asimismo la oportunidad de aumentar la cuota de mercado de las tecnologías de capa delgada. Ya hay nuevas compañías trabajando en el desarrollo de la producción de capa delgada sobre la base de un enfoque “rollo a rollo”. Esto significa que se recubre un sustrato flexible, como por ejemplo el acero inoxidable, con capas en un proceso continuo. La implantación con éxito de este método de producción ofrecerá oportunidades para un aumento significativo del rendimiento de la fábrica junto con una reducción de costes.

De las tres tecnologías de capa delgada disponibles en el mercado, Silicio amorfo es la más importante en términos de producción e instalación, con un 5,2% del total del mercado en 2007.

3.5.4 SILICIO AMORFO

En esta tecnología, el vapor de silicio amorfo es depositado en un par de láminas extradelgadas en rollos de acero inoxidable.

Comparado con el silicio cristalino, esta tecnología utiliza sólo el 1% del material. Su eficiencia suele ser entre el 6 y 8%. La vida útil de las celdas de silicio amorfo es más corta que la de las de silicio monocristalino. Actualmente se están produciendo celdas solares delgadas. Son especialmente rentables debido a que, sólo necesita una mínima cantidad de silicio para fabricarlas.

La tabla 7 ilustra el rendimiento de las celdas solares, dependiendo la tecnología utilizada.

Tabla 7. Rendimiento de celdas y módulos solares.

Rendimiento de celdas y módulos						
Tecnología	Capa delgada				Basada en disco cristalino	
	Silicio Amorfo	Cadmio Teluro	Cl(G)S	Si-a/Si-m	Monocristalina	Multicristalina
Rendimiento de celda en CPE*	5-7%	8-11%	7-11%	8%	16-19%	14-15%
Rendimiento del módulo					13-15%	12-14%
Área necesaria por kW(para los módulos)	15 m ²	11 m ²	10 m ²	12 m ²	aprox. 7m ²	aprox. 8m ²

Fuente: ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE. Solar generation V – 2008: Electricidad solar para más de mil millones de personas y dos millones de puestos de trabajo para el año 2020. [En línea]. Bélgica: Patricia Philbin, 2008. p.17. <Disponible en: http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/biblioteca/1920081625511_Solar-Generation-V-2008.pdf> [consulta: 1 Feb. 2009]

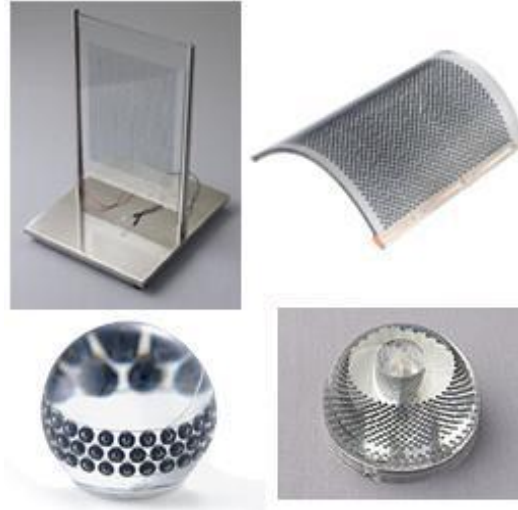
(*) Condiciones de Prueba Estándar: 25 °C, intensidad lumínica de 1000 W/m², masa de aire = 1,5.

3.5.5 CELDAS ESFÉRICAS

En esta tecnología la materia prima son gotas de silicio cristalino de baja calidad, las gotas de 25.8 cm² se aplican sobre la lámina delgada de aluminio perforado; en el proceso las impurezas son estiradas hacia la superficie y desde aquí son grabados los diseños. Dado que cada esfera trabaja independientemente, si una esfera falla el impacto es insignificante en el rendimiento promedio de la mayor parte de la superficie. Estas celdas solares esféricas son capaces de absorber la radiación solar con cualquier ángulo. Actualmente Japón es líder en desarrollar este tipo de celdas solares, con un tamaño entre 1 y 1,5 mm de diámetro y una eficiencia que supera el 20%, ver figura 14.

La disposición de estas celdas en un medio flexible y transparente, amplía el campo de aplicaciones para la energía FV, como la posibilidad de incorporarlas en pequeños aparatos electrónicos o convertir grandes superficies acristaladas como generadores de electricidad.

Figura 14. Celdas solares con forma esférica



Fuente: KYOSEMI. Spherical Photovoltaic Solar Cell. [En línea]. s.l: El Autor, 2007. <Disponible en: http://www.kyosemi.co.jp/product/pro_ene_sun_e5.html> [consulta: 15 Feb. 2009]

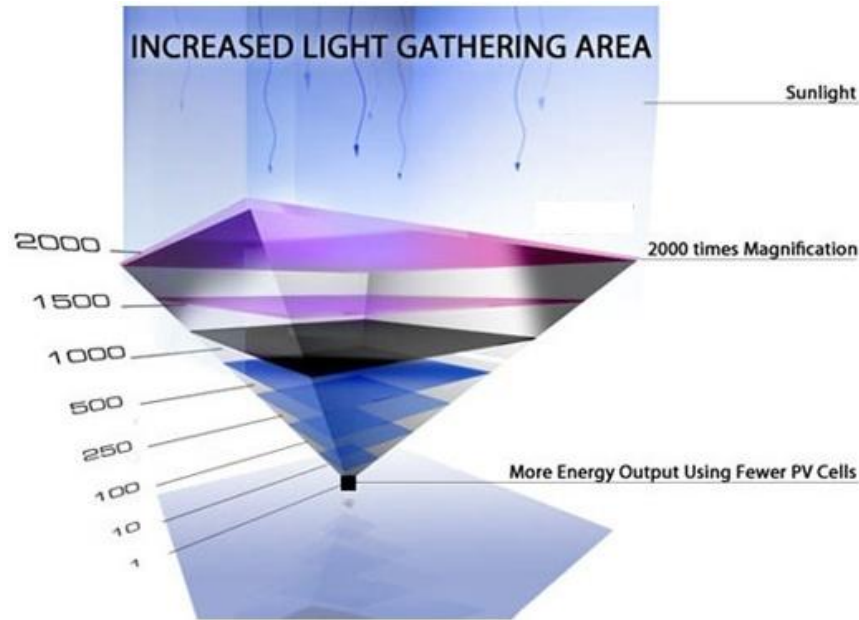
3.5.6 CELDAS CONCENTRADAS

En un intento por mejorar la eficiencia de conversión, surge un nuevo modelo de celdas solares que producen mayor cantidad de energía que un panel normal.

Las nuevas celdas emplean materiales altamente configurables como concentradores, lentes y espejos. La luz solar es concentrada en cientos de veces de la intensidad normal, enfocando sobre una pequeña área, utilizando lentes de bajo costo y muy eficientes. Ver figura 15.

Los sistemas de celdas solares concentradas darán lugar a industrias generadoras que serán del interés de las empresas energéticas superando la escala de los paneles solares de techo.

Figura 15. Lente concentrando la luz solar sobre una pequeña área.



Fuente: SUNRGI. Technology. [En línea]. s.l: El Autor, 2008. <Disponible en: <http://www.sunrgi.com/increased-light-gathering-area.html>> [consulta: 15 Feb. 2009]

La principal ventaja es que estas celdas requieren una pequeña fracción de la superficie en comparación con las celdas estándar, por lo tanto, reducen significativamente el requisito de utilizar material FV. Sin embargo, el área total del módulo sigue siendo el mismo para capturar la energía necesaria. Además de aumentar la potencia y reducir el número de celdas. Otra ventaja es que resulta más fácil producir celdas de pequeña área con alta eficiencia que celdas mucho más grandes con eficiencia comparable a las primeras. Por otro lado, la mayor

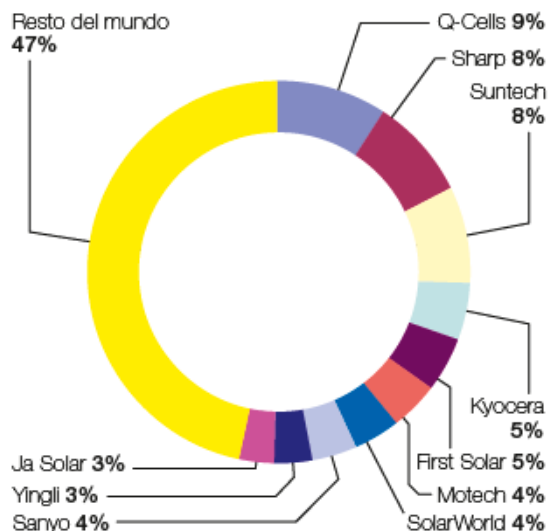
desventaja de las celdas concentradas es que requieren enfoque óptico y esto aumenta su costo³⁰.

Hasta ahora, la fabricación de celdas y módulos solares ha estado concentrada en tres zonas geográficas: Europa, Japón y Estados Unidos. No obstante, el país con mayor crecimiento en instalaciones de producción es China. En la figura 16, se pueden observar las principales compañías productoras, el primer lugar lo ha ocupado la empresa japonesa Sharp, sin embargo, desde 2007 ha venido perdiendo cuota de mercado en relación con sus competidores, principalmente con las empresas con base en Alemania Q-Cells y Solarworld y la china Suntech. Todas ellas juntas han reducido la posición dominante de Sharp del 23,6% en 2005 al 8,5% en 2007. En 2007, Q-Cells se convirtió en el nuevo líder del mercado. Las 10 principales compañías manejan algo más del 53% de toda la producción de celdas (en contraste con el 75% de 2006); casi todas ellas realizan en la actualidad fuertes inversiones en nuevas instalaciones de fabricación³¹.

³⁰ PATEL, Op. Cit., p.138.

³¹ ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE, Op. Cit., p.26.

Figura 16. Principales fabricantes de celdas solares en el mundo 2008.



Fuente: ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE. Solar generation V – 2008: Electricidad solar para más de mil millones de personas y dos millones de puestos de trabajo para el año 2020. [En línea]. Bélgica: Patricia Philbin, 2008. p.27. <Disponible en: http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/biblioteca/1920081625511_Solar-Generation-V-2008.pdf> [consulta: 2 Feb.2009]

3.6 ASPECTOS MEDIOMBIENTALES

La característica más importante de los sistemas solares FV es que no producen emisiones de dióxido de carbono durante el funcionamiento. A pesar de que se producen emisiones indirectas en otras etapas del ciclo de vida, estas son significativamente más pequeñas que las emisiones que se evitan. No hay contaminación en forma de humos de escape o ruidos y el desmantelamiento de los sistemas no es problemático. Aunque no hay emisiones de CO₂ durante el funcionamiento, sí se genera una pequeña cantidad durante la fase de producción. La energía FV sólo emite de 21 a 65 gramos de CO₂ por kWh, dependiendo de la tecnología utilizada. Los módulos FV son reciclables, y las materias primas se pueden volver a utilizar. En consecuencia, se reduciría más aún el consumo de

energía asociado a la tecnología FV. Según la hipótesis Avanzada de Solar Generation³², habría una reducción anual de las emisiones de CO₂ de 1600 millones de toneladas. Esta reducción equivaldría a las emisiones de 450 plantas alimentadas por carbón (de un tamaño medio de 750MW). El dióxido de carbono es responsable de más del 50% del efecto invernadero producido por el hombre, lo que le convierte en el contribuyente más importante al cambio climático. Se genera principalmente en la combustión de fósiles. El gas natural es el combustible fósil más respetuoso con el medioambiente, ya que produce más o menos la mitad de CO₂ que el carbón, y menos gases contaminantes de otros tipos. La energía nuclear produce muy poco CO₂, pero conlleva a otros importantes problemas de protección, seguridad, proliferación y polución asociados a su explotación y sus residuos. Las consecuencias del cambio climático ya pueden percibirse en la actualidad.

Aparte de la electrificación de edificios, aplicaciones como iluminación o de control y calefacción en viviendas; la energía solar FV se puede instalar fácilmente en zonas aisladas, en lugares donde la conexión a la red puede tardar mucho tiempo. Además se puede combinar la energía FV con otras tecnologías de energía renovable, o con un grupo electrógeno; lo cual posibilita la prestación de servicios esenciales, como iluminación, refrigeración, educación, comunicación y salud y resultan ser económicas y respetuosas con el medio ambiente.

³² Ibid., p.52.

4. GENERADORES DIESEL³³

Actualmente la mayoría de ZNI suplen sus necesidades energéticas por medio de generadores diesel convirtiéndose en la principal fuente de generación de energía eléctrica garantizando el acceso a los principales servicios y logrando una mejor calidad de vida. Sin embargo los costos de los combustibles, niveles de contaminación sonora y ambiental, y los mantenimientos de los equipos hacen que si no se lleva una estricta rutina y control tanto técnico como administrativo de estos elementos, la calidad del servicio y disponibilidad del mismo tienda a deteriorarse en el tiempo.

En el presente capítulo se pretende mostrar otra forma de generación de energía por medio de la utilización de grupos electrógenos o también llamados plantas diesel. Resaltando la forma de operación y las diferentes aplicaciones que pueden ser en conjunto con las redes de servicio público ó de forma autónoma.

Un Grupo Electrónico ó Generador Diesel está compuesto por un motor de combustión interna y un generador eléctrico. El primero es el encargado de transmitirle la energía del combustible por medio de un par mecánico al generador eléctrico que posteriormente lo transforma en energía eléctrica por medio de inducción electromagnética.

³³ Los contenidos de este capítulo fueron adaptados del libro: GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. p.34. (Nabla – Delta; No.31)

En la actualidad el motor de combustión interna más utilizado para un grupo electrógeno es el motor diesel sin embargo, se construyen y ensamblan motores a gas, gasolina y biodiesel.

Para VALENCIA³⁴, “los Generadores Diesel se construyen en principio para tres categorías de empleo básicas:

- Fuente auxiliar o de emergencia(Stand-By oEmergency)
- Fuente principal (Prime)
- De operación continua (Continuous)

Dichas categorías son definidas por normas internacionales.

La categoría de empleo Stand-By sólo es aplicable (y recomendada) en plantas que van a funcionar por períodos de corta duración originados generalmente por una interrupción en el suministro de energía normal. En esta categoría la planta no admite sobrecarga sostenida o estacionaria y únicamente puede aplicarse a sistemas que operan con carga variable con un factor de carga que no sobrepase el 80%, y al 100% de su capacidad, solo por períodos no mayores de una hora y un máximo de 200 horas de operación por año; permitiendo que la planta se enfríe y pueda regresar nuevamente a la temperatura ambiente inicial, antes de ponerla en funcionamiento para una segunda operación.

³⁴ Ibid., p.318.

La categoría de empleo Prime es aplicable en principio a plantas eléctricas cuando se carece del servicio de energía normal, o cuando se tienen establecidos períodos muy prolongados de racionamiento. En esta categoría es posible utilizar la planta bajo condiciones de carga variable limitada a un factor de carga normal hasta 80%, por cualquier número de horas por año.

La categoría de empleo definida como Continuous es aplicable al suministro de potencia en forma continua por un número ilimitado de horas por año bajo condiciones de carga constante o variable a la potencia especificada en la placa como “continuous power rating” o “base power rating”. En esta categoría la planta puede operarse en forma independiente o en paralelo y no admite capacidad de sobrecarga. Este tipo de plantas son las de uso corriente por las compañías de electricidad que tienen como finalidad la venta o comercialización de energía.

4.1 CATEGORÍA DE EMPLEO DE LOS GENERADORES DIESEL

La categoría de empleo de una planta, define aspectos constructivos relevantes que físicamente permiten diferenciar unas de otras, suponiendo una misma potencia especificada en placa.

Estas diferencias se pueden observar principalmente a nivel del sistema de enfriamiento del motor, el sistema de lubricación y en general en los materiales y el tamaño físico de la carcasa, tanto del generador como del motor. Muchos fabricantes dimensionan una misma planta para su uso en dos categorías de empleo; como por ejemplo *stand-by* y *prime*. Esto evidentemente implica que la potencia máxima para funcionamiento como *prime* debe reducirse en un porcentaje importante (entre 8% y 13%, definido por el fabricante) con respecto a la potencia máxima de funcionamiento en *stand-by*.

La potencia máxima de una planta está limitada por la temperatura última (máxima) a la cual pueden llegar algunos de los componentes más sensibles y críticos del motor y del generador, a partir de la cual se originan daños severos en el grupo electrógeno. Son puntos críticos por ejemplo, la temperatura al interior del motor (pistones, bloque de cilindros) y los devanados principales del generador, entre muchos otros.

Téngase presente que entre tres grupos electrógenos de igual capacidad operando a plena carga, pero de diferente categoría, se puede ver más exigido el que tiene funcionamiento como *continuous*, seguido del que tiene categoría *prime* y por último el de *stand-by* o *emergency*.

4.2 APLICACIONES DE LOS GENERADORES DIESEL

Los generadores diesel tienen una gran utilización en todo el mundo estos tienen dos grandes clasificaciones: como fuente primaria o fuente auxiliar de energía y en ambos casos deben considerarse las categorías de empleo, teniendo en cuenta los requerimientos de la instalación eléctrica existente y el tipo de carga a conectar.

4.2.1 Aplicación como fuente primaria

Como fuente primaria, un generador diesel es la fuente principal o única de energía, lo que implica un servicio continuo o por períodos de tiempos repetitivos y prolongados, con carga constante o variable.

Las aplicaciones primarias para un grupo electrógeno recaen en cuatro modos de empleo principales:

- En sitios remotos

Es el caso donde no hay servicio de suministro de energía eléctrica y resulta muy alto el costo de construir líneas de transmisión desde la central generadora o la fuente disponible más cercana. Para este caso se mencionan algunos ejemplos reales en Colombia. Ver anexo B.

- En áreas totalmente inaccesibles para las líneas de transmisión eléctricas

Esta situación se presenta en instalaciones ubicadas en islas alejadas de la costa, en plataformas de perforación submarina, en dragas y embarcaciones, entre otras.

- Para proveer energía eléctrica a menor costo que las empresas de energía

Este puede ser el caso en el cual se dispone de combustible a costo reducido y en cantidad suficiente. En general, el costo actual de los combustibles sólo hace posible una operación competitiva (como fuente primaria) cuando la generación de alternativa es de origen térmico.

- En la operación de equipos delicados

Cuando se dispone de una fuente de servicio continuo pero de funcionamiento irregular o con una regulación muy pobre, se pueden originar serios daños en los equipos y dispositivos eléctricos.

La solución a este problema es entonces la de separar las cargas delicadas y alimentarlas con un generador diesel independiente, que pueda producir un flujo de energía más constante y regulado.

Una alternativa diferente es mantener el grupo electrógeno conectado en paralelo con la red de la empresa de energía, con el propósito de estabilizar el nodo de tensión y mejorar la regulación, particularmente en los períodos de máxima

demanda. Este modo de funcionamiento, aunque puede beneficiar a otros usuarios, requiere de la autorización del operador de red.

4.2.2 Aplicación como fuente auxiliar

Como fuente auxiliar o de emergencia, un grupo electrógeno constituye una especie de seguro eléctrico en caso de fallar el suministro de energía.

Las aplicaciones de un generador diesel como fuente auxiliar o de emergencia se pueden relacionar en los siguientes grupos:

- Para cumplir requisitos de seguridad pública

Es el caso donde una falla en el suministro de energía puede llegar a ser asunto de vida o muerte, como en hospitales, estaciones de bomberos o de policía, aeropuertos, centrales telefónicas, plantas de tratamiento de agua potable, subestaciones de energía, centrales eléctricas, instalaciones militares, edificios públicos e instalaciones deportivas, entre otras.

- Para cumplir requisitos de seguridad privada

Este grupo hace referencia a aquellos lugares que necesitan de sistemas de aire acondicionado o ventilación; en restaurantes, hoteles, supermercados o centros comerciales donde se requiere un alumbrado de emergencia; para la operación de ascensores y bombas de agua; así como la operación de sistemas de control y mecanismos de seguridad.

- Para cumplir requisitos de seguridad económica

Es el caso en el cual un corte de energía puede originar daños en los equipos y pérdida de materiales o producción.

- Como fuente para el respaldo de la demanda máxima

Cuando las empresas de energía aplican tarifas industriales con el criterio de cobro por demanda máxima o de pico; esto crea otra alternativa de mercado para los generadores diesel. Estas tarifas eléctricas se aplican teniendo en cuenta el máximo consumo de energía durante un cierto período de tiempo.

Cuando alguna operación produce un aumento inesperado en la carga durante algún momento del día, el contador de demanda está atento para registrar el valor máximo de pico.

Para conservar el pico de demanda en valores mínimos, puede resultar ser mucho más viable separar las cargas exigentes del servicio suministrado por las empresas de red a un grupo electrogeno el cual se encarga de manejar o suplir esta demanda³⁵.

4.3 COMPONENTES BÁSICOS DE UN GENERADOR DIESEL

Un grupo electrógeno se compone de cinco elementos fundamentales:

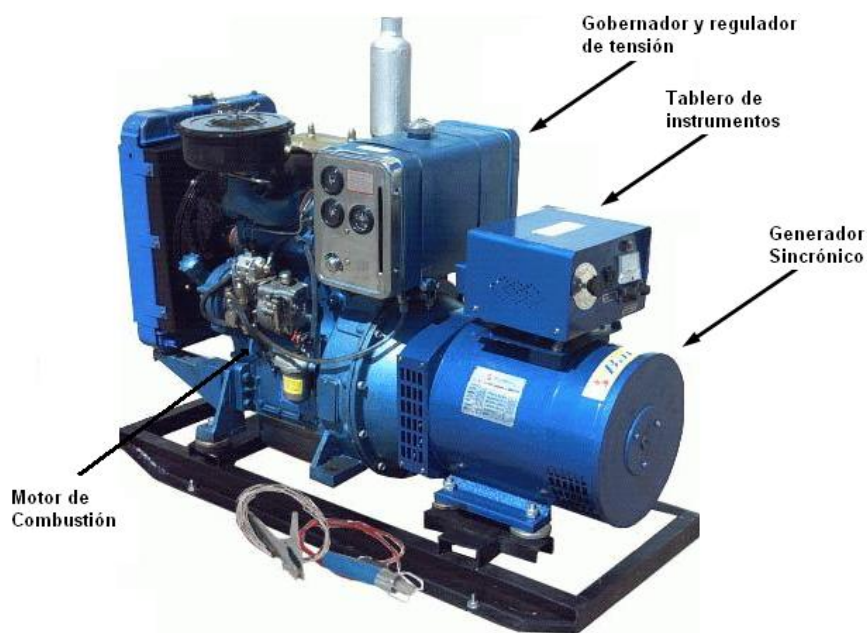
- El motor, encargado de convertir la energía química del combustible en energía mecánica de movimiento.
- El gobernador de velocidad, encargado de mantener el motor dentro de un régimen apropiado de velocidad angular a pesar de las variaciones de la demanda de energía mecánica originadas por los cambios de carga eléctrica.

³⁵ Ibid., p.3-7.

- El generador eléctrico, encargado de convertir la energía mecánica proporcionada por el motor en energía eléctrica.
- El regulador de tensión, encargado de mantener constante la tensión de salida del generador a pesar de los cambios de carga eléctrica que presente la instalación del usuario.
- El tablero de instrumentos, en donde se tiene el control, la supervisión y la información del desempeño del generador Diesel.

En la figura 17 se muestra las partes de un generador diesel.

Figura 17. Partes de un generador diesel



Fuente: ELECTRICASAS. Preguntas frecuentes sobre grupos electrógenos. [En línea]. s.p.i. <Disponible en: <http://images.google.com.co/images?q=grupo+electrogeno>> [consulta: 1 Mar. 2009]

4.3.1 EL MOTOR DIESEL

Los Generadores Diesel emplean como impulsor el motor de ignición por compresión denominado MOTOR DIESEL. Este es un motor térmico de combustión interna en el cual el encendido se logra por la temperatura elevada

que produce la compresión del aire en el interior del cilindro. Fue inventado y patentado por Rudolf Diesel en 1895.

Típicamente los motores Diesel se diseñan con relaciones de compresión muy altas que producen presiones elevadas del orden de 20000 psi y por tanto, temperaturas muy altas en el aire que se comprime en las cámaras de combustión del motor.

4.3.1.1 Características del motor diesel

Para VALENCIA “en general, los motores Diesel son máquinas de construcción robusta, larga duración y económicas en su funcionamiento.

Comparativamente con el motor de gasolina, el Diesel funciona a velocidades bajas, tiene una presión de compresión mucho más alta, produce menos emisiones contaminantes sin dispositivos auxiliares, pero es más ruidoso que el de gasolina.

Aunque son de construcción similar en las piezas mayores (bloque de cilindros, cigüeñal, pistones, culata de cilindros, múltiple, etc.) hay diferencias en los detalles y otras piezas del motor, particularmente en el sistema de encendido y combustión.

El motor Diesel emplea un combustible diferente de la gasolina, de mayor densidad y más económico denominado ACPM (Aceite Combustible Para Motor), o simplemente combustible Diesel”³⁶.

³⁶ Ibid., p.479.

4.3.2 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR

El generador ó alternador recibe el nombre de máquina sincrónica ya que en condiciones estacionarias la velocidad a la cual gira es impuesta y definida por la frecuencia del sistema eléctrico sobre el que opera.

El generador consta básicamente de dos componentes principales:

- El conjunto giratorio, denominado rotor
- El conjunto estacionario, denominado estator

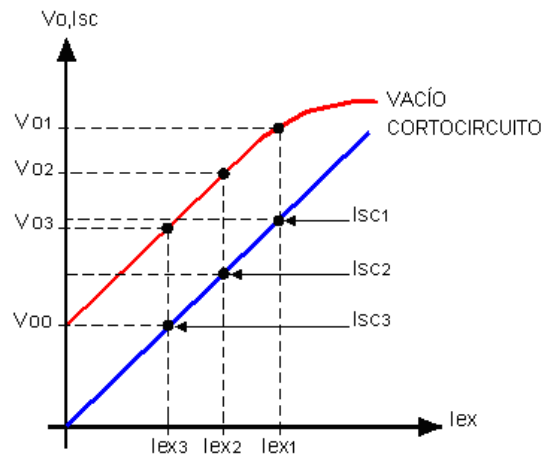
“Tanto el rotor como el estator están conformados por devanados. Uno de ellos se denomina inducido y el otro campo. En bornes del devanado del inducido se obtiene la tensión generada. En bornes del devanado de campo se aplica una señal de corriente directa para producir un campo magnético. El inducido puede estar conformado por varios devanados, según el número de fases”³⁷.

4.3.2.1 Características del generador en vacío, cortocircuito y en carga

Las curvas características del generador en vacío y en cortocircuito se muestran en la siguiente figura:

³⁷ Ibid., p.84.

Figura 18. Curvas características en vacío y cortocircuito de un generador sincrónico



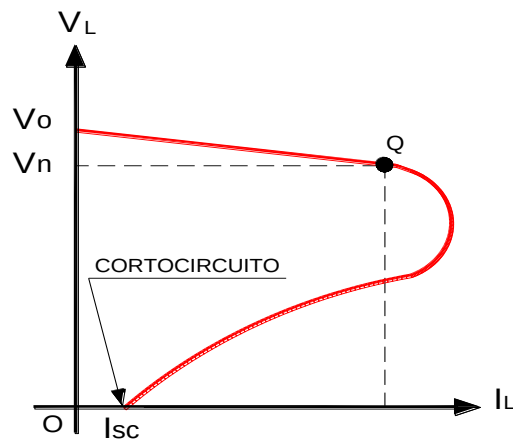
Fuente: GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. p.94. (Nabla – Delta; No.31)

Esta gráfica incluye el efecto de saturación magnética y un voltaje inicial que es debido al flujo remanente (V_{00}) en vacío y en corto se puede notar que al aumentar la corriente de excitación aumenta la corriente de cortocircuito (I_{sc}).

La variación de la tensión de salida va disminuyendo gradualmente a medida que la corriente de carga aumenta, suponiendo velocidad y corriente de excitación constantes, con carga resistiva o inductiva.

Cuando se tienen máquinas autoexcitadas, cuya corriente de excitación se obtiene de los propios terminales de salida del generador (después de hacer una rectificación de la corriente), la variación de la corriente de salida con la corriente de carga, suponiendo velocidad constante y carga resistiva o inductiva, es la que se muestra en la figura 19.

Figura 19. Variación de la tensión en bornes de salida de un generador autoexcitado con la corriente de carga (para carga R / R-L)



Fuente: GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. p.99. (Nabla – Delta; No.31)

La potencia de salida de un generador está relacionada con el área bajo la curva que muestra la variación de la tensión de salida del generador con la corriente de carga.

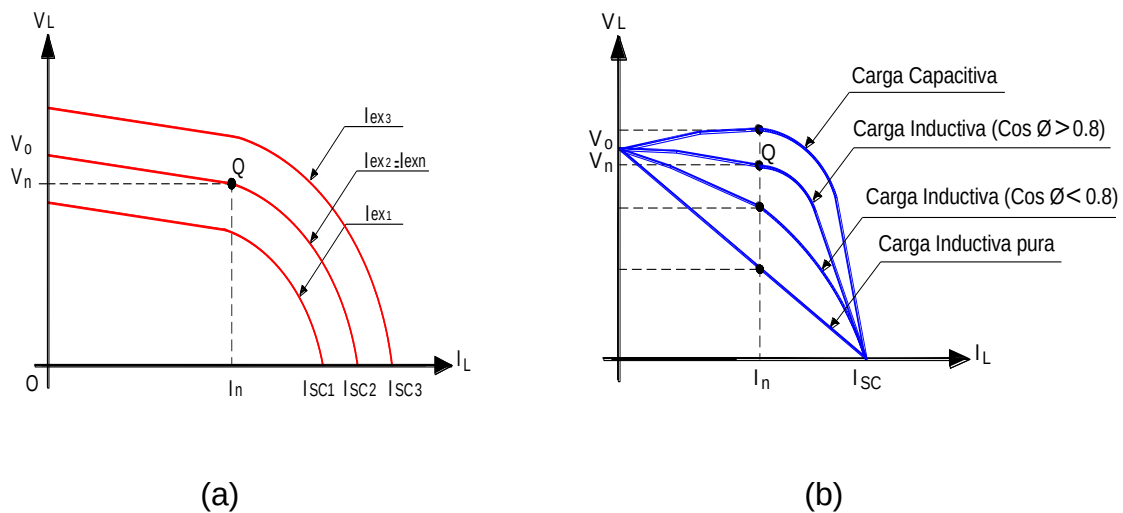
En la figura 20a se muestran varias curvas características, para velocidad nominal constante y diferentes valores de la corriente de excitación I_{ex} , en generadores de excitación independiente.

La potencia que puede entregar un generador es afectada notoriamente con las variaciones de la corriente de excitación y la velocidad. De ahí que la operación de un generador sincrónico exija un control muy estricto de estas dos variables.

La figura 20b muestra la forma como varía la tensión de salida del generador para diferentes tipos de carga, suponiendo I_{ex} y w constantes.

De esta figura puede apreciarse que la regulación de tensión del generador disminuye cuando la carga es muy inductiva.

Figura 20. a) Comportamiento del generador de una planta diesel ante variaciones de la corriente de excitación (velocidad constante). b) Variación de la tensión de salida de un generador con la corriente para diferentes tipos de carga.



Fuente: GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. p.101-102. (Nabla – Delta; No.31)

Para carga capacitiva, la regulación es negativa, y su efecto se manifiesta por una elevación de la tensión en bornes del generador. Esta condición de sobretensión no es deseable, por lo que se impone una reducción o limitación de la corriente de excitación para mantener la tensión de salida en el valor nominal. Lo contrario sucede bajo condiciones de carga inductiva, lo cual exige un incremento en la corriente de excitación, con riesgo de sobrepasar los valores de diseño de la máquina.

El regulador automático de tensión del generador de un grupo electrógeno tiene en cuenta este comportamiento para garantizar el funcionamiento satisfactorio de la máquina, particularmente cuando se manejan cargas cuyo factor de potencia se encuentra entre 0.8 y 1.0; valores que corresponden con el rango de diseño típico³⁸.

4.4 LA TEMPERATURA AMBIENTE EN EL SITIO DE LA INSTALACIÓN DEL GRUPO ELECTRÓGENO

Para VALENCIA “En general, para plantas eléctricas cuyo motor es refrigerado por agua, la máxima temperatura ambiente, en condiciones normales de funcionamiento, no debe exceder el valor especificado por muchos fabricantes, la cual es de 40°C.

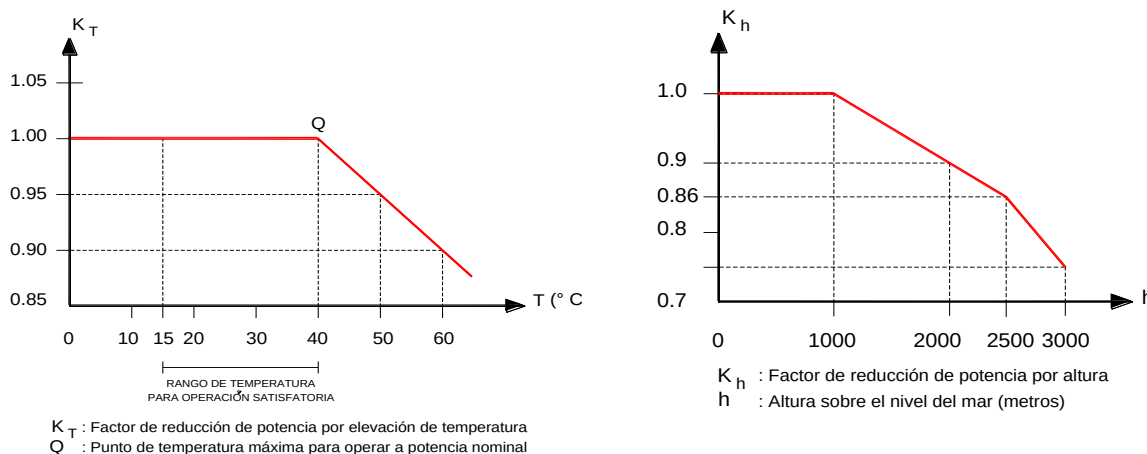
Los generadores diesel refrigerados por agua trabajan satisfactoriamente entre 15°C y 40°C, aunque la norma indique para los motores Diesel una referencia de 25°C.

Cuando la temperatura ambiente es superior a 40°C, la capacidad de placa se puede ver reducida entre 1% y 2.5% por cada 5°C de elevación. La mayoría de los fabricantes de generadores diesel suministran curvas particulares de degradación de potencia en función de la temperatura ambiente, según se ilustra en la gráfica de la figura 21a.

³⁸ Ibid., p.82-102.

La altura es otro factor importante dentro de la capacidad efectiva de un generador diesel; ya que a mayor altura el aire es menos denso y se ve reducida la capacidad de refrigeración y relación aire combustible, como se muestra en la figura 21b³⁹.

Figura 21. (a) Curva típica de disminución de potencia por elevación de la temperatura ambiente para un generador diesel. (b) Curva típica de disminución de potencia por cambio de altura sobre el nivel del mar para un grupo electrógeno



Fuente: GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. p.22-26. (Nabla – Delta; No.31)

Actualmente la utilización de grupos electrogenos es alto, debido a los conceptos de confiabilidad y seguridad que se requieren al momento de casos de emergencia y suplir la demanda de energía eléctrica en cualquier industria o en sitios donde es indispensable tener un respaldo, por ejemplo en hospitales, en

³⁹ Ibid., p.22-26.

lugares de grandes multitudes de personas, en fabricas, entre otras. Además logran garantizar el desarrollo sostenible y suplir las necesidades básicas de ciertas zonas rurales que se encuentran aisladas de la conexión a la red.

La aplicación de los usos productivos de la energía esta generalmente orientada a satisfacer necesidades individuales y de las comunidades principalmente para la producción de alimentos, y en menor proporción, abastecimiento de agua, iluminación, educación y salud.

Las principales aplicaciones de los usos productivos de la energía están relacionadas a las particularidades de cada zona, es decir las aplicaciones finales varían de comunidad a comunidad, así como a la disponibilidad de las fuentes de energía renovable.

El siguiente capítulo trata la implementación de sistemas híbridos, que consiste en combinar diferentes estrategias de generación de energía, que pueden operar de forma aislada, teniendo como fuente de generación las energías renovables en este caso eólica y solar, respaldada por un grupo electrógeno que funciona en momentos donde se presente ausencia de las renovables.

5. SISTEMAS HÍBRIDOS

5.1 USO DE LA ENERGÍA EÓLICA EN SISTEMAS AISLADOS

En el mundo de la electrificación rural, los dos métodos más utilizados para la prestación del servicio de energía eléctrica son: la ampliación de la red y el uso de generadores diesel. En las zonas remotas ambas opciones pueden ser sumamente costosas, la red de electrificación o la continuación de la dependencia en el combustible diesel.

La inclusión de las tecnologías renovables puede reducir el costo de vida para el abastecimiento de energía a las zonas rurales. La combinación de una tecnología renovable barata con una tecnología disponible más costosa puede proporcionar una alternativa más aplicable.

Los sistemas de energía donde se utilizan múltiples fuentes de generación, se definen como “sistemas híbridos” y pueden incorporar diferentes componentes, tales como la producción, el almacenamiento, el acondicionamiento de potencia y el sistema de control para el suministro de energía a una carga aislada de la red.

El sistema híbrido clásico incluyen barras para los sistemas de corriente directa (CD) (Banco de baterías) y corriente alterna (CA) (para el motor del generador y de distribución), sin embargo, los últimos avances en electrónica de potencia y en sistemas de control están haciendo solo una única barra CA, lo que hace que los sistemas sean más rentables. La tecnología renovable puede asociarse a una barra de CA o CD dependiendo del tamaño y la configuración del sistema. El suministro de energía de las casas u otros sistemas por lo general es CA, aunque

algunas cargas pueden ser conectadas de una barra de CD. Estos sistemas de energía pueden variar en tamaño, desde unos pocos kWh, hasta muchos MWh por día.

Los sistemas para cargas pequeñas, menores de 100 kWh por día se enfocan generalmente alrededor de una barra CD mientras que sistemas más grandes tienden a utilizar una barra CA como el punto de conexión principal.

Los recientes avances en electrónica de potencia y de control han permitido el adelanto de los pequeños dispositivos conectados CA-CD donde cada dispositivo de la producción de energía renovable incluye su propio convertidor y control de potencia que le permite coordinar la producción de energía. Cada configuración, sin embargo, puede tener varios esquemas. Sistemas más pequeños utilizarán probablemente grandes bancos de baterías, proporcionando unos días de almacenamiento, y utilizarán dispositivos más pequeños para la generación de energía renovable conectados a una barra de CD. En Sistemas más grandes las conexiones se centran en una red de distribución de CA, con el diseño de todas las tecnologías renovables conectados a está; además, el banco de baterías, se utiliza generalmente pequeño y su función principalmente es cubrir las fluctuaciones en la producción de energía. Por lo general contienen equipos más grandes que permiten una economía de escala y, por tanto, menor consumo en los costos de la energía⁴⁰.

⁴⁰ ACKERMAN, Op. Cit., p.300.

5.1.1 Configuraciones y conceptos de los sistemas híbridos

En los sistemas que se centran en torno a una barra de CD, la batería actúa como un amortiguador de potencia, disminuyendo las fluctuaciones en el flujo de energía a corto o a largo plazo.

Para sistemas de CA la cuestión clave es el equilibrio en la regulación de la tensión de la carga. Esto se hace normalmente con el uso de condensadores sincrónicos, bancos disponibles de carga, el almacenamiento, la electrónica de potencia avanzada y sistemas de control que vigilarán atentamente las condiciones de funcionamiento de cada uno de los componentes, para garantizar el correcto funcionamiento de frecuencia y voltaje. Además, la inclusión de un banco de baterías puede proporcionar un suavizado en la potencia, aunque se debe tener cuidado en el control de energía del sistema.

En los siguientes numerales se presentan tres figuras para describir los tres tipos generales de sistemas híbridos. La primera, la figura 22, ilustra un pequeño sistema eléctrico de CD convencional que proporciona CA usando un inversor de energía, en segundo lugar, la figura 23 muestra un pequeño sistema de energía enfocado a una red de CA, por último, la figura 24 muestra una gran red de CA asociada al sistema eléctrico.

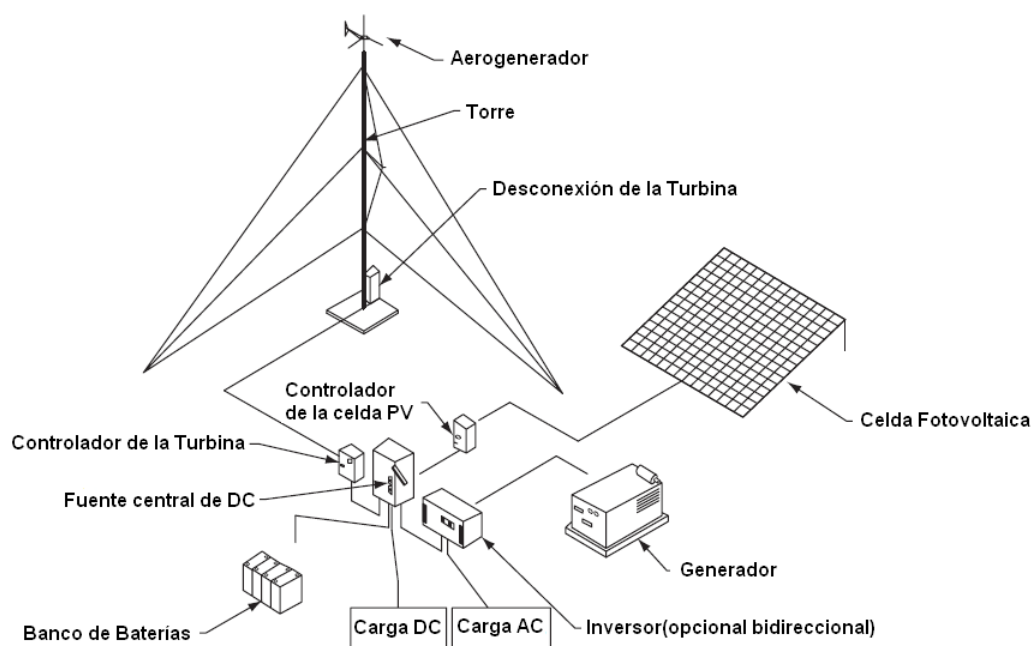
Pequeños aerogeneradores (<20 kW), también pueden ser conectados directamente al sistema, la aplicación más común de estos son, el bombeo de agua en la agricultura o potabilización, producción de hielo, carga de baterías y compresión de aire⁴¹.

⁴¹ MILLER, N. y YE, Z. Wind/Diesel power systems basics and examples. [En línea]. Colorado: National Renewable Laboratory, 2007. p.4. <Disponible en: www.nrel.gov> [consulta: 6 Jun.2009]

5.1.1.1 Sistemas híbridos aislados en CD

En la figura 22 se ilustra un pequeño sistema de energía convencional de CD, basado en un sistema de alimentación de CA usando un convertidor de energía. El uso de las energías renovables en pequeños sistemas híbridos ha crecido con las tecnologías en aerogeneradores y la reducción de los costos en el uso de la tecnología fotovoltaica (FV).

Figura 22. Sistema híbrido de CD



Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.301.

La mayoría de estos sistemas utilizan una topología donde la batería se utiliza como punto de conexión a la barra de CD. En general, los pequeños aerogeneradores suministran tensión y frecuencia variable en CA, la cual se rectifica a la tensión nominal de la batería y se aplica a la barra de CD. La energía almacenada en la batería se convierte en CA a través de un inversor, esto con el fin de suministrarlo a la carga.

El uso del banco de baterías suaviza las fluctuaciones de potencia del aerogenerador y permite suministrar la energía cuando no hay viento. En los casos en que es necesario garantizar la energía, se puede utilizar un generador diesel.

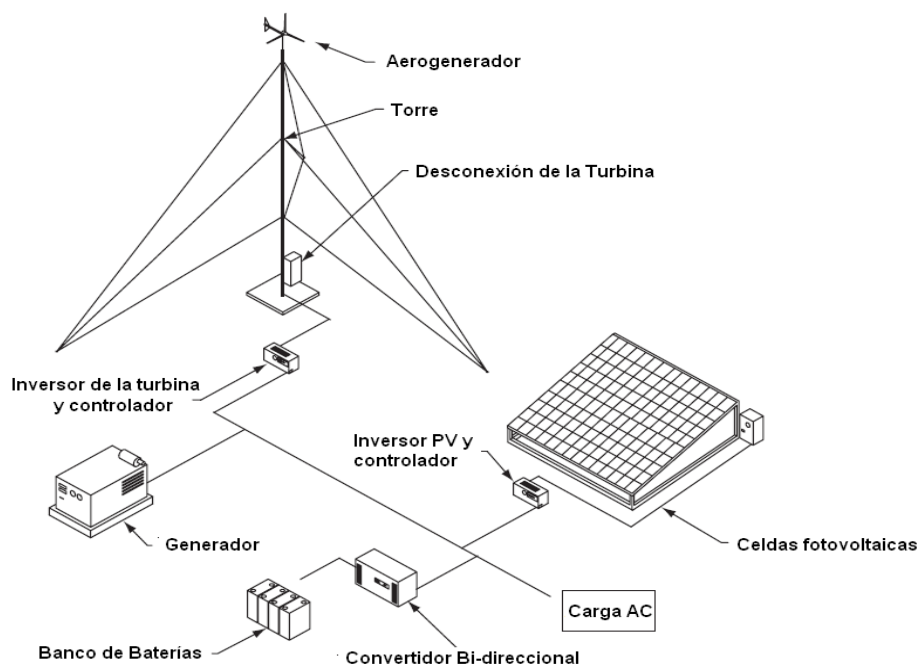
El control en pequeños sistemas de energía CD es generalmente realizado por medio de la tensión del banco de baterías. Todos los generadores tienen un limitador de tensión, lo que reduce o deriva cualquier energía generada por el aerogenerador, si la batería está cargada. Recientes investigaciones realizadas en el National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Baring-Gould et al., 2001, 1997; Corbus et al., 2002; Newcomb et al., 2003) han demostrado las grandes pérdidas de los aerogeneradores asociadas a la limitación prematura de la energía por el controlador de CD, para evitar la sobrecarga del sistema de baterías. Por esta razón, se debe tener cuidado al diseñar este sistema de energía ya que hay que lograr una adecuada coherencia entre los diferentes componentes. Todos los inversores y dispositivos de carga también tienen protección para baja tensión lo que produce una desconexión de las baterías descargadas, si está disminuye de un valor fijado. La energía suministrada a la línea de CA es controlada a través del inversor, que puede proporcionar un sistema de control adicional de la unidad.

5.1.1.2 Sistemas híbridos aislados en CA

Las recientes mejoras en la electrónica de potencia, control y convertidores de energía han dado lugar a la aparición de una nueva topología de sistema, la figura 23 muestra un pequeño sistema de energía centrado en una barra de CA. Estos sistemas utilizan pequeños componentes, de CA y CD para la generación, FV y del viento, conectados a través de un inversor inteligente dedicado a la red de distribución de CA. Una batería que se utiliza para suavizar las fluctuaciones de potencia, y también incluye su propio convertidor de potencia. La principal ventaja de esta topología es su modularidad, ya que permite la conexión o la sustitución

de módulos adicionales de energía cuando sea necesario. En segundo lugar, la instalación de cada uno de los componentes en cualquier lugar a lo largo de la micro-red. Estos sistemas usan la frecuencia de la red para comunicar los requerimientos de potencia entre los módulos de generación y almacenamiento. Los dos inconvenientes de este sistema son el costo y el uso de tecnología muy sofisticada que será muy difícil de implementar para el servicio en zonas remotas.

Figura 23. Sistema híbrido de CA



Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.303.

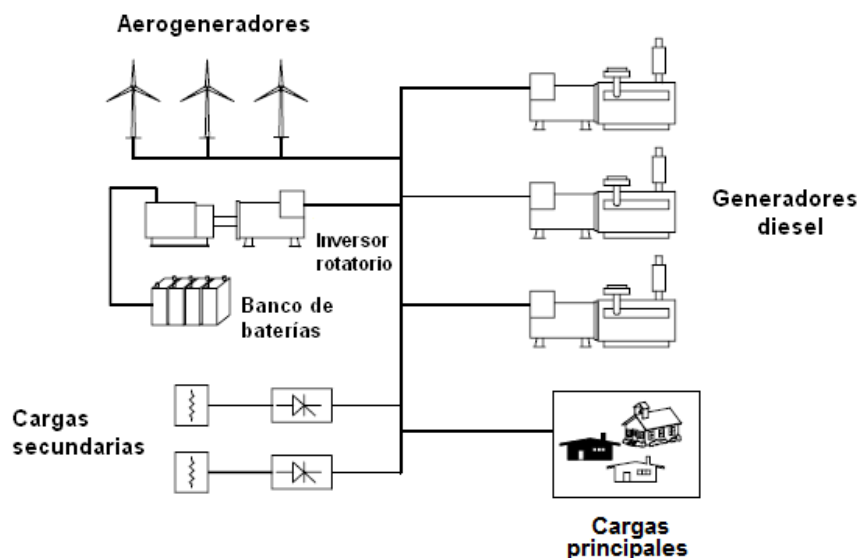
Otra limitación podría presentarse en los sistemas en los que se requieren grandes cantidades de energía almacenada, como los sistemas fotovoltaicos diseñados para proporcionar iluminación nocturna, en ellos, esta tecnología puede dar lugar a mayores pérdidas.

5.2 SISTEMA EÓLICO-DIESEL

Generalmente, los sistemas eólico-diesel de gran potencia se conectan a una barra de distribución de CA. En la figura 24 se ilustra uno de ellos.

El objetivo principal en los sistemas E-D es utilizar la energía eólica para reducir el consumo de combustible, manteniendo al mismo tiempo una calidad de la potencia aceptable. Lo anterior permite hacer económicamente viable la inversión en la instalación de los aerogeneradores y equipos adicionales como inversores, controladores y dispositivos estabilizadores de tensión y potencia de la red.

Figura 24. Sistema típico Eólico-Diesel de gran potencia



Fuente: DROUILHET, Steve. NREL National Renewable Energy Laboratory: High Penetration AC Bus Wind-Diesel Hybrid Power Systems. Golden, Colorado, USA: NREL, 2008. p.7.

El diseño óptimo de un sistema E-D se debe basar en un análisis cuidadoso, y no solamente en la obtención de la máxima cantidad de energía eólica posible. Debido al gran número de pequeñas redes con sistemas diesel aislados, en los países desarrollados y en los que están en desarrollo, el mercado de implementación y adaptación de estos sistemas con una energía más barata a

partir de fuentes renovables, es una opción muy atractiva. Este mercado representa una importante oportunidad a nivel internacional para la utilización de energía eólica en lugares aislados de la red de distribución.

Un sistema diesel típico, aislado de la red de distribución, se puede caracterizar por lo siguiente:

- Tiene uno ó algunos sistemas de generación diesel (grupos electrógenos). Mediante el uso de una serie de grupos electrógenos en cascada con un óptimo diseño para la carga, se logra incrementar la eficiencia de la planta diesel.
- El sistema de potencia actual, tiene un sistema de control muy simple; normalmente un gobernador y regulador de tensión, complementados con dispositivos de autosincronización.
- La infraestructura local puede ser limitada y es posible que no disponga de recursos para el funcionamiento, el mantenimiento y el reemplazo.
- El combustible es costoso y en general, es a veces escaso y propenso a problemas de almacenamiento.
- Los generadores diesel proporcionan suficiente control de frecuencia y de tensión para atender en óptimas condiciones la carga, esto se logra mediante un control en el campo del generador.

5.2.1 CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES BÁSICAS PARA CENTRALES EÓLICO-DIESEL

Un sistema de generación eléctrica por medio de un generador diesel en una población aislada donde se incorpora el viento, se puede definir como sistema

híbrido E-D cuando el diseño y operación son altamente influenciados por la presencia del viento en términos de:

- control de frecuencia, estabilidad del sistema de tensión y distorsión armónica limitada;
- las condiciones de funcionamiento de los generadores diesel, especialmente en lo que respecta a la carga mínima;
- cláusulas para el uso de todos los excedentes de energía eólica;
- operación, mantenimiento y reemplazo, de cualquier componente del sistema.

Los sistema E-D pueden variar desde simples diseños en los que, los aerogeneradores están conectados directamente a la red del generador diesel con un mínimo de características adicionales, ó sistemas con diseños más complejos.

Lo complicado de adicionar energía eólica a las plantas diesel es que la producción de energía a partir de los aerogeneradores está controlada por el viento, es decir, la mayoría de las turbinas no pueden controlar la tensión y la frecuencia de la línea; por lo tanto deben utilizar otro tipo de equipo para hacerlo. Con pequeñas cantidades de energía eólica, los generadores diesel pueden ofrecer esta función de control, pero con grandes cantidades de energía eólica es necesario otro tipo de equipo.

Pensando en esto, se presentan dos cuestionamientos importantes sobre la aplicación del diseño y componentes necesarios del sistema: uno es la cantidad de energía que se espera de las fuentes renovables (nivel de penetración) y el otro es la capacidad del sistema para poder mantener un equilibrio de potencia entre la generación y el consumo (el uso principal para el almacenamiento de energía).

5.2.1.1 Penetración de la energía eólica

Al incorporar las tecnologías renovables basados en sistemas de abastecimiento de energía aislados, la cantidad de energía que se obtiene de las fuentes renovables es de gran influencia en la técnica de diseño, rendimiento y economía del sistema. Por esta razón, es necesario explicar dos nuevos parámetros, la penetración instantánea y la penetración promedio del viento, ya que ayudan a definir el rendimiento del sistema.

La penetración instantánea, llamada la penetración de la Potencia, se define como el coeficiente entre la salida instantánea de potencia del aerogenerador P_{wind} (en kW), y la demanda instantánea de potencia de la carga primaria P_{load} (en kW):

$$Penetración\ de\ Potencia = \frac{P_{wind}}{P_{load}} \quad \text{Ecuación 4}$$

La penetración de potencia es principalmente una medida técnica, ya que determina en gran medida el diseño, componentes y principios de control que deben aplicarse en el sistema.

La penetración promedio, llamada también, penetración de energía, se define como el cociente de la producción de energía del aerogenerador E_{wind} (en kWh), y la carga promedio primaria E_{load} (en kWh), medido en días, meses o incluso años:

$$Penetración\ media = \frac{E_{wind}}{E_{load}} \quad \text{Ecuación 5}$$

La penetración promedio es principalmente una medida económica, ya que determina el costo normalizado de la energía del sistema, indicando cuanto de la generación total proviene de dispositivos de energía renovable.

Dependiendo del uso y condiciones de instalación, varía la complejidad del sistema. En los sistemas E-D, existen tres tipos de sistemas de penetración: baja, media y alta. En la tabla 8 están representadas las principales características de cada uno de estos sistemas.

Tabla 8. Clasificación de los sistemas híbridos E-D según la penetración

Clasificación de los Sistemas E-D según la penetración			
Tipo de penetración	Características de operación	Penetración	
		Potencia instantánea	Promedio anual
Baja	Funcionamiento del Diesel todo el tiempo. La energía eólica reduce la carga sobre el Diesel Toda la energía eólica abastece la carga principal El sistema de control no es supervisado	50%	20%
Media	Funcionamiento del Diesel todo el tiempo Cuando hay altos niveles de energía eólica el excedente se utiliza en cargas secundarias y se reduce la generación diesel Requiere de un sistema de control sencillo	50% - 100%	20% -50%
Alta	El diesel se puede apagar cuando hay altas disponibilidades de viento Son necesarios componentes auxiliares para control de tensión y corriente Requiere sistema de control sofisticado	100% – 400%	50% -150%

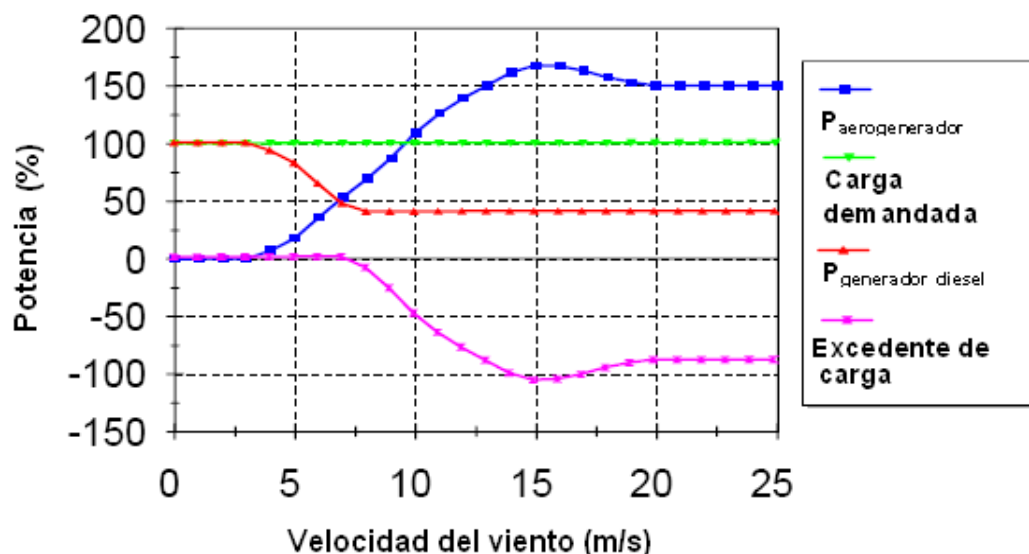
Fuente: BARING-GOULD, E. Ian. NREL National Renewable Energy Laboratory. s.l: Integration of wind into diesel power systems. Golden, Colorado, USA: NREL, 2008. p5.

5.2.1.2 Balance de potencia

Como un ejemplo del comportamiento entre la generación y el consumo de energía, la figura 25 muestra el equilibrio de potencia de un sistema básico E-D,

donde la carga instantánea demandada por el consumidor se aprecia en un 100%. Con el fin de destacar los problemas, el sistema ilustrado en la figura 25 tiene una proporción excepcionalmente alta de la energía eólica.

Figura 25. Balance de energía de un sistema E-D



Fuente: RISØ NATIONAL LABORATORY. Presentation at a visit by Danida and IFU at Risø National Laboratory. s.l: El Autor, 2005. p.5.

A bajas velocidades del viento, el generador diesel produce la potencia necesaria para sostener toda la demanda, pero a medida que la velocidad del viento aumenta, se incrementa la producción de energía del aerogenerador y se refleja una disminución de la producción de los generadores diesel. Finalmente, el generador diesel llega a su carga mínima, definida por el fabricante; el excedente de energía debe ser utilizado, ya sea por el limitador de la producción de energía o por el desvío de los excedentes a un control de carga. Si la configuración del sistema y el control admiten esto, el diesel también podría ser apagado, permitiendo que la carga sea completamente suministrada por la energía eólica.

5.2.1.3 Sistema básico de operación y control

La configuración más simple del sistema E-D, se presenta cuando el aerogenerador está conectado a la red de distribución de CA. Este sería el caso de un bajo nivel de penetración del sistema eléctrico.

Cuando la potencia de salida del aerogenerador es menor que la carga demandada, el generador diesel es el encargado de mantener el suministro eléctrico; el gobernador de éste controla la frecuencia de la red y el regulador del generador sincrónico mantiene la tensión estable.

Si la potencia del aerogenerador es igual o cercana a la carga demandada menos la carga mínima del generador diesel, unos *resistores controlables*, se pueden incluir para absorber el posible excedente de energía del aerogenerador, en este caso el resistor controlable ayuda a regular la frecuencia. Este sería un caso de penetración media de un sistema eléctrico.

Si el aerogenerador puede producir más potencia de la demandada por la carga, es necesario un sistema más complejo, que podrá incluir el almacenamiento de energía para suavizar las fluctuaciones, como se muestra en la figura 24. En este caso, algunos excedentes de energía son almacenados para su posterior utilización en caso de necesidad. También es posible apagar por completo todos los generadores diesel. Aunque en este caso se maximiza el ahorro de combustible, se requiere un estricto control de todos los componentes del sistema eléctrico para garantizar la estabilidad del sistema. Además, la gran fluctuación de la energía eólica puede plantear problemas adicionales para el control y la regulación del sistema. Esta última sería la configuración característica de un sistema eléctrico de alta penetración, como se ilustró en la figura 24.

Como puede entenderse de manera intuitiva, cuanto más alta es la penetración del viento, más proporción de la energía generada no puede ser inyectada a la red. En lugar de buscar simplemente disipar ese excedente de energía, se puede

utilizar en una carga secundaria o provisional, que permita satisfacer otras necesidades para una comunidad tales como:

- Producción de agua dulce (por ejemplo: la desalinización, la purificación, etc.);
- para hacer hielo;
- calentamiento de agua;
- calefacción en las casas;

generalmente estas cargas se clasifican en dos categorías:

- **Cargas opcionales:** Son las cargas que deben suplirse siempre y cuando, los excedentes de energía estén disponibles.
- **Cargas aplazables:** Son cargas que deben suplirse durante un determinado período de tiempo, y si no alcanzan a ser satisfechas por el excedente de energía, entonces serán alimentadas por la red de distribución de energía primaria.

Además, algunas de estas cargas pueden ser controladas por el sistema eléctrico momentáneamente para reducir la demanda de energía requerida, por lo tanto, el sistema estaría ahorrando, ya que, no sería necesario arrancar un nuevo generador para cubrir lo que es sólo un defecto momentáneo de potencia. Esto se conoce a menudo como la *gestión de la demanda*.

5.2.1.4 Economía del sistema básico

Como en cualquier sistema de potencia, la economía juega un papel clave en la selección del diseño del sistema y tecnología a aplicar. La razón para considerar la energía eólica como una adición a la generación a base de diesel, se debe a que esta es de menor costo. Sin embargo, como el nivel de penetración del sistema

aumenta, hemos visto que la complejidad del sistema de energía también se incrementa, y posteriormente se ve afectado por el precio. Por lo tanto, el nivel óptimo de penetración del viento depende de la diferencia de costo relativo entre el aumento de la penetración del viento y la diferencia entre la generación eólica y la utilización de la tecnología diesel. También es claro, que si se utilizan los excesos de energía eólica, en lugar de otros combustibles mucho más costosos para proporcionar servicios adicionales, como la calefacción, la economía mejora por el uso de estas fuentes alternas.

5.2.1.5 Función del almacenamiento en sistemas E-D

El almacenamiento puede ser utilizado en sistemas de alta penetración para suavizar las fluctuaciones en la carga, cubrir los déficit de generación en caso de que no haya viento, indisponibilidad de los generadores diesel o para proveer un arranque gradual a estos últimos.

En general, para el almacenamiento de energía se utilizan bancos de baterías, y volantes de inercia. Ambas estrategias requieren la adición de algunos de dispositivos de acondicionamiento de potencia o el uso de un convertidor bidireccional. Muchas otras formas de almacenamiento se han propuesto o experimentado. Sin embargo, la aplicación más exitosa ha sido la generación hidroeléctrica a partir de reservorios de agua bombeada previamente, usando los excesos de potencia.

El uso del hidrógeno como medio de almacenamiento se está posesionando recientemente. En este caso, un electrolizador aprovecha el exceso de energía para separar el hidrógeno, que luego se almacena para su uso posterior. Un motor de combustión interna o pilas de combustible se utiliza para convertir el hidrógeno en electricidad, cuando sea necesario. Dado que el potencial de almacenamiento depende en gran parte del tamaño de los mecanismos de acumulación, a largo

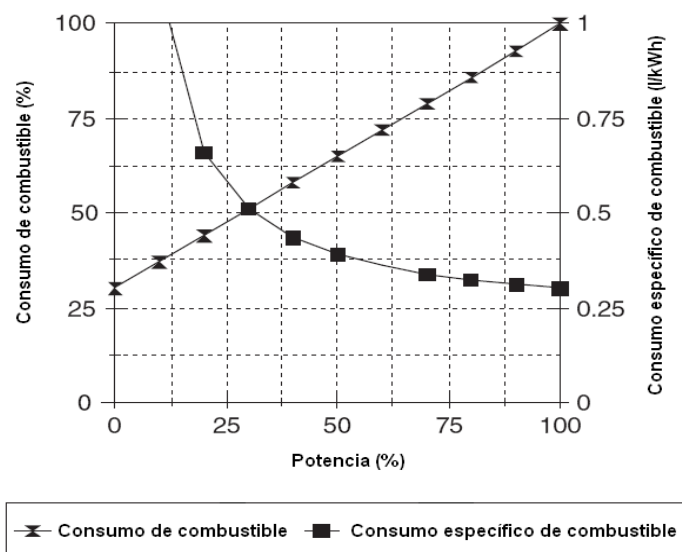
plazo esta opción parece ser muy atractiva. Por otra parte, el altísimo costo de los electrolizadores y las pilas de combustible, así como la baja eficiencia del sistema, (30% en comparación con el 80% de baterías de plomo-ácido) constituye una desventaja desde el punto de vista económico; Además, dado que ni las celdas de hidrógeno, ni los motores de combustión interna se pueden iniciar en forma instantánea, seguirá siendo necesaria alguna forma de almacenamiento de energía a corto plazo (Cotrell y Pratt, 2003).

La economía de los sistemas de almacenamiento de energía depende en gran medida de la fiabilidad y el costo, tanto de la electrónica de potencia, que se espera mejorar de manera significativa con el tiempo, y del propio medio de almacenamiento. Pronósticos acerca de la vida útil de las baterías, bajo las condiciones específicas del sitio, se convierten en un importante problema económico y técnico.

Para el caso de los sistemas sin almacenamiento, son determinantes los retardos asociados con el funcionamiento del sistema diesel en términos de despacho de energía. La figura 26, representa el consumo de pequeños generadores diesel.

Cuando la producción del generador diesel disminuye, probablemente como resultado de una penetración instantánea cada vez mayor del viento, la disminución absoluta del consumo de combustible cae notablemente en litros por hora, proporcional con la potencia, pero esto no alcanza a llegar a cero.

Figura 26. Consumo de combustible de un generador diesel.



Fuente: ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005. p.309.

Por lo tanto, el consumo específico de combustible no disminuye proporcionalmente con la disminución de potencia sobre el diesel. Por esta razón, siempre es mejor apagar las máquinas diesel, cuando no son necesarias en lugar de tener que operar a muy baja carga.

5.3 SISTEMA EÓLICO-SOLAR (E-S)

Los sistemas híbridos eólico-solares optimizan las mejores condiciones del viento y el sol, complementándose entre sí. Los días fríos y de viento, normalmente nublados, apenas permiten aprovechar la luz solar, mientras que son ideales para los aerogeneradores. Por su parte, los días de anticiclón suelen provocar cielos despejados con poco viento, y por tanto, más adecuados para las placas fotovoltaicas.

Los sistemas E-S resultan apropiados para la electrificación de todas aquellas aplicaciones que se encuentran aisladas, alejadas de las redes de distribución eléctrica. Las más típicas son las siguientes:

- Viviendas rurales
- Instalaciones de bombeo y riego
- Sistemas agrícolas
- Estaciones repetidoras de telecomunicación
- Refugios

5.3.1 Componentes del sistema

Los componentes de un sistema híbrido E-S esencialmente son los siguientes:

- **Generador Solar Fotovoltaico:** compuesto de un número de módulos solares interconectados en serie/paralelo (dependiendo del voltaje necesario), incluyendo elementos de la conexión y de protección. Este elemento entrega energía eléctrica convertida a partir del sol.
- **Generador Eólico:** convierte la energía mecánica del viento en energía eléctrica.
- **Banco de Baterías:** almacenan electricidad para suministrar energía por la noche o en días muy nublados. Generalmente de plomo-ácido; en la actualidad existen nuevas baterías de alta calidad diseñadas especialmente para las aplicaciones híbridas, con una vida útil de más de 15 años. No obstante, el tiempo de vida de una batería depende en gran medida de la forma de utilización y del comportamiento del usuario.
- **Controlador de carga:** la batería está conectada al sistema FV, mediante este componente. Es función del controlador proteger la batería contra las

sobrecargas o descargas y en ocasiones proporcionar información sobre el estado del sistema.

- **Inversor:** convierte la CD producida por un generador FV en CA compatible con la red de distribución eléctrica.
- **Elementos de protección del circuito:** se disponen entre diferentes elementos del sistema para proteger contra daño en caso de alguna falla o situación de sobrecarga. Son ejemplos los interruptores de desconexión, diodos de bloqueo, etc.
- **Estructura:** necesaria para montar o instalar los módulos FV, la turbina eólica y otros componentes.

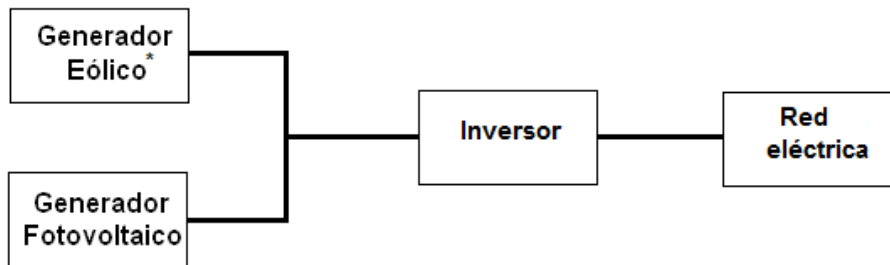
Es preciso anotar, que no todos los sistemas requieren de todos estos componentes. Por ejemplo en sistemas donde la carga es CD, no está presente un inversor ya que, no se requiere. Para sistemas conectados a la red, la empresa prestadora del servicio eléctrico, actúa como soporte de almacenamiento y las baterías no son necesarias. Algunos sistemas también requieren de otros componentes; ciertos sistemas autónomos por ejemplo utilizan un generador auxiliar que proporciona la electricidad cuando el sistema de baterías se agota; y en sistemas de bombeo de agua se necesita de una bomba de CA o CD.

5.3.2 Sistemas E-S conectados a la red

Los sistemas conectados a la red no cuentan con sistema de acumulación o baterías, ya que la energía producida es entregada a la red eléctrica. En efecto, en estas instalaciones la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos y el aerogenerador, pasa directamente al inversor que la transforma, luego de pasar por los elementos de medida y protección correspondientes; y finalmente es entregada como corriente alterna a la red, con el fin de venderla o simplemente brindarle apoyo (ver figura 27).

Actualmente, en países con sistema de primas, el pago por la electricidad generada es considerablemente mayor que la tarifa normal pagada por el cliente a la compañía suministradora. Este es el caso de países como Alemania o España.

Figura 27 . Sistema E-S conectado a la red eléctrica.



Las aplicaciones que se distinguen para este tipo son:

- Centrales E-S, en las que toda la energía producida se inyecta a la red eléctrica.
- Sistemas integrados en edificios, donde la energía producida satisface la demanda eléctrica del lugar en las horas de gran consumo y la energía sobrante en las horas de menor consumo, es vendida a la red eléctrica.

5.3.3 Sistemas E-S aislados

En estos la energía eléctrica producida se utiliza para satisfacer la demanda de energía de lugares donde no llega ó existe la red eléctrica de distribución ó ésta es de difícil acceso.

Las aplicaciones más comunes son:

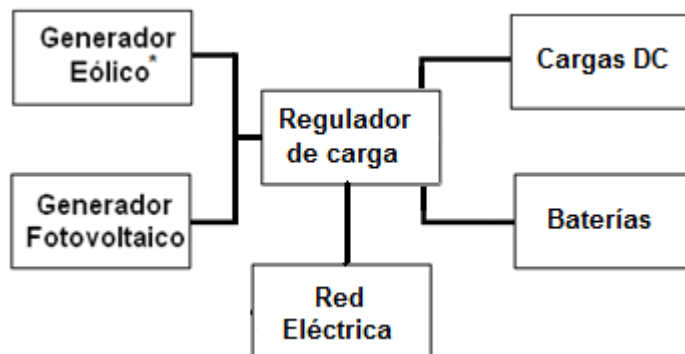
- Electrificación de viviendas alejadas de la red eléctrica
- Bombeo de agua, sistemas de riego, iluminación de granjas, huertas...

- Señalización y comunicaciones: navegación aérea y marítima, señalización de carreteras, repetidoras de telecomunicaciones...
- Iluminación pública, parada de autobuses...
- Otras

En estas aplicaciones, a fin de poder disponer de electricidad durante la noche o en períodos de poca insolación, se hace necesaria la acumulación de energía eléctrica, generalmente mediante baterías, con el correspondiente regulador de carga o controlador y cuando es necesario un inversor.

La figura 28 muestra, de forma esquemática los componentes de un sistema E-S aislado.

Figura 28. Sistema E-S autónomo para alimentación de cargas de CD.



(*)Típicamente los generadores eólicos de muy baja potencia, son utilizados en sistemas autónomos porque generan CD.

5.4 PROYECTOS CON SISTEMAS HÍBRIDOS ED-ES

5.4.1 Ejemplos de Proyectos ED-ES En Colombia

En Colombia las fuentes de energías renovables se convierten en una alternativa para incentivar el desarrollo de las ZNI del país.

El 66% del territorio nacional no tiene acceso a la red de energía eléctrica, aproximadamente un 89% de la población de carácter rural; el gobierno cuenta con institutos como el IPSE, encargado de identificar, promover, fomentar, desarrollar e implementar soluciones energéticas mediante esquemas empresariales eficientes, viables financieramente y sostenibles en el largo plazo, procurando la satisfacción de las necesidades de las ZNI; a través de su misión, el IPSE mejora las condiciones de vida de las comunidades, ofreciendo soluciones energéticas estructurales; con principios de conservación ambiental y respeto por la diversidad, soportado en un equipo humano en constante formación y crecimiento.

Algunos de los proyectos pilotos con fuentes alternas, que se han implementado y otros que se encuentran en ejecución son los siguientes:

- GENERACIÓN CON SISTEMA HIBRIDO SOLAR-DIESEL-TITUMATE

Este proyecto se encuentra ubicado en la localidad de Titumate-Municipio de Unguía-Choco, incluye estudio de la demanda, instalación del sistema de generación FV, diseño y construcción de redes de baja tensión, acometidas y luminarias ahorradoras. El proyecto se inició en junio de 2008.

- GENERACIÓN CON SISTEMA HIBRIDO EÓLICO-SOLAR. NAZARETH, (GUAJIRA)

El proyecto se encuentra ubicado en el corregimiento de Nazareth en el municipio de Uribí en el Departamento de La Guajira. Incluye estudio de demanda, de potencial de generación de organización comunitaria y generación de energía eléctrica; el proyecto se inició en junio de 2008

El IPSE con fundamento en su misión institucional, adelanta otros programas y proyectos orientados a la búsqueda de soluciones energéticas en el ámbito de las

energías no convencionales, como: Biomasa, Bioalcohol, energía eólica, Energía solar, sistemas híbridos, entre otros⁴².

Es importante aclarar que el proyecto de grado se fundamenta en sistemas híbridos, con aplicación en ZNI, es decir sin ser conectados a la red. Ahora es importante identificar, que para una zona donde hoy no llega el SIN, puede implementarse un sistema híbrido con recursos del FAER y cuando se tenga la posibilidad de llegar con la red, los mismos pueden integrarse a ella aportando su energía al sistema interconectado.

5.4.2 Proyectos con sistemas Híbridos a nivel mundial

- Uno de los casos de estudio se encuentra en Chile en América latina; se encuentra ubicado en la isla Tac en el archipiélago de Chiloe. Consiste en 32 islas con más de 3500 familias en las cuales es imposible ampliar la red de energía eléctrica debido a los costos que esto conlleva. Un proyecto piloto ED fue instalado en la isla Tac, por medio de un programa de cooperación de la Comisión Nacional de Electricidad de Chile.
- El proyecto entro en operación en octubre del año 2000, la energía eléctrica es proporcionada para suplir una oficina de correos, un colegio y 24 horas al día para 71 familias que se encuentran a 13km de la red de distribución de energía. El Sistema cuenta con dos aerogeneradores (7.5kW cada uno), baterías (48V), dos inversores (4.5 kW) conectados en paralelo y un generador diesel (12 kW) que sirve como respaldo al sistema.

⁴² FORO DE NORMALIZACIÓN Y CONTEXTO NACIONAL EN ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA (Bogotá): . Memorias. [Documento en formato PDF]. Bogotá: ICONTEC; UPME, s.f. p.25.

En el anexo H se pueden apreciar algunos proyectos que se están desarrollando y han sido implementados por algunos países en el mundo.

En el último capítulo se muestra la simulación del control de un sistema híbrido E-D con carga constante analizando la respuesta ante diferentes cambios de viento por medio del software PSCAD.

6. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO E-D

En anteriores capítulos se estudió los sistemas híbridos y cada una de sus características. Para tener una mejor idea de su funcionamiento, se mostrarán los resultados de la simulación de un sistema híbrido E-D, modelado ante posibles cambios de viento con el fin, de ilustrar la función del generador diesel como estabilizador o *slack* del sistema. La configuración del sistema E-D a modelar es mostrado esquemáticamente en la figura 29. Estos sistemas híbridos son típicos, para aplicaciones en zonas aisladas. La potencia de salida del aerogenerador en el sistema es representada por P_w , P_D como la potencia de salida del generador diesel y la potencia total como P .

El software a utilizar para la simulación del sistema es el PSCAD⁴³.

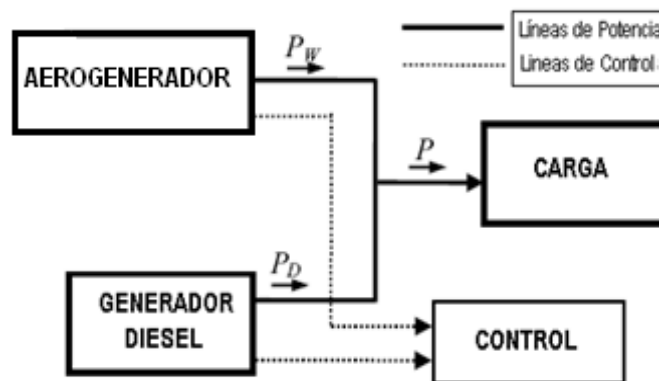
El PSCAD son las siglas de Power System CAD y significa Diseño Asistido por computador de Sistemas de Potencia. Esta herramienta permite, a partir de la introducción de un esquema eléctrico, simular su comportamiento y analizar los resultados, todo ello en un entorno gráfico de manejo sencillo e intuitivo. Tiene, en consecuencia, integradas herramientas de representación de variables, medidores, elementos de control y modelos de componentes eléctricos. PSCAD resulta ideal en el análisis de transitorios en:

⁴³ PSCAD/EMTDC. Power system simulation software: user's manual, EMTDC versión 4.2. Canadá: El Autor, 2005.

Líneas de transporte y cables, sistemas embarcados, grandes cargas industriales no-lineales, sistemas de electrónica de potencia y accionamientos, defectos asimétricos, generación de energía distribuida, máquinas rotatorias, sistemas facts/hvdc, energía eólica, sistemas fotovoltaicos, etc.

Uno de los más importantes campos de aplicación de PSCAD es el de la energía eólica, ya que dispone de modelos muy precisos de turbinas, generadores, modelos de viento, y todas las herramientas necesarias para su implementación. Este es uno aspectos claves al momento de escoger el software para la simulación del presente capítulo, ya que en la búsqueda de software de ingeniería eléctrica como herramienta de apoyo en el tema de interés, no fue fácil encontrar un programa con las características y aplicaciones que se acomodaran al sistema a modelar. En principio no se tenía conocimiento de este programa, lo cual implico un mayor desafío y tiempo para llevar a cabo el modelamiento del sistema híbrido.

Figura 29. Sistema Híbrido E-D aislado.



Fuente: KUMAR AMIT, Jindal; ANIRUDDHA M., Gole y DHARSHANA, Muthumuni. Modeling and performance analysis of an integrated Wind/Diesel Power System for Off-Grid Locations. Bombay: National Power Systems Conference, 2008. p.6.

Un sistema híbrido E-D es de gran utilidad en zonas remotas donde hay una fuente de viento constante. Cuando la demanda es baja, la energía eólica es utilizada para el suministro de la carga.

Cuando la demanda es alta los generadores diesel entran a funcionar junto con los aerogeneradores para abastecer la carga demandada; el gran objetivo de éste funcionamiento es disminuir el consumo de combustible siempre que haya el suficiente viento para producir electricidad. Si hay un déficit en la disponibilidad del viento, el generador diesel está en la capacidad de abastecer toda la carga demandada.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA E-D

Para evaluar el desempeño del sistema híbrido E-D, se ha considerado una población con una demanda fija de 1MW. Se supone que el generador diesel suministra el 70% de la carga total, mientras que el 30% restante se suministra a través de un aerogenerador.

A continuación se describe cada uno de los subsistemas y los parámetros más relevantes utilizados en la simulación:

6.1.1 Turbina Eólica

El MOD-2 de turbina eólica, ha sido utilizado en la simulación ya que este modela la turbina con 3 palas. El modelo determina el torque a la salida de la turbina (T), dada una velocidad de viento (W_v), una velocidad de la máquina (W_w) y el ángulo de paso (pitch) (β).

Los parámetros utilizados para la turbina eólica son detallados en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros del aerogenerador

AEROGENERADOR		
	Valor	Unidad
Potencia nominal	0.5	MVA
Velocidad nominal de la máquina	1200	RPM
Radio del rotor	30	m
Area de barrido del rotor	2827	m ²
Densidad del aire	1.299	Kg/m ³
Eficiencia de la caja multiplicadora	0.97	p.u
Relación entre la turbina y la máquina	GR	
Ecuación del coeficiente de potencia	MOD- 2	

6.1.2 Generador de Inducción

En los aerogeneradores comúnmente se emplean generadores de inducción, ya que, tienen la característica de aumentar o disminuir la velocidad dependiendo de la variación del viento; esto es una propiedad mecánica muy útil, porque implícitamente se varía el torque, por lo tanto, habrá menor rotura y desgaste en la caja multiplicadora.

El funcionamiento de la máquina de inducción se determina a partir del torque electromagnético y el deslizamiento; si estos son negativos corresponde al funcionamiento como generador; ó si son positivos corresponde al funcionamiento como motor.

Los parámetros utilizados para la simulación del generador de inducción son:

Tabla 10. Parámetros Generador de inducción

GENERADOR DE INDUCCIÓN		
	Valor	Unidad
Potencia nominal	0.3	MVA
Tensión nominal (L-L)	0.327	kV
Frecuencia angular	376.99	rad/seg
Relacion de espiras del estator/rotor	1	
Momento de inercia angular	3	s
Amortiguamiento mecánico	0.0005	p.u
Relación entre la turbina y la máquina	GR	

6.1.3 Motor Diesel

El controlador del motor, es un simple control PI que está comparando el error entre la velocidad de giro del generador sincrónico y una velocidad de referencia en este caso de 1 p.u a la salida del controlador; esta genera la señal de aceleración ó desaceleración que controla la entrada de combustible al motor.

Los parámetros utilizados en la simulación del conjunto motor generador fueron:

Tabla 11. Parámetros conjunto motor-generador

MOTOR DIESEL		
	Valor	Unidad
Potencia del generador	1	MW
Potencia de la máquina	1	MVA
Velocidad nominal del generador	1800	rpm
Eficiencia de la caja multiplicadora	1	
Relación de transmisión de la caja multiplicadora	85	

6.1.4 Generador Sincrónico acoplado al Motor Diesel

La función del generador sincrónico es suministrar la potencia eléctrica necesaria para mantener la potencia de salida constante, esto se realiza mediante el control de todo el sistema motor-generador.

El modelo del generador sincrónico de polos salientes es basado en la teoría de los ejes d - q ⁴⁴. El modelo permite la representación de los efectos transitorios y sub-transitorios, así como la saturación de la máquina.

⁴⁴ SIMÕES, M. G. y otros. Electrical model development and validation for distributed resources. [Documento en formato PDF]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2007. p.1-51.

Tabla 12. Parámetros generador sincrónico

GENERADOR SINCRÓNICO		
	Valor	Unidad
Voltaje nominal RMS L-N	0.127	kV
Corriente de línea nominal RMS	1.952	kA
Frecuencia angular	376.9	rad/s
Constante de inercia	1.7	s
Fricción mecánica del inducido con el aire	0.0	p.u
Resistencia serie del neutro	1.0E5	p.u
Reactancia serie del neutro	0	p.u
Resistencia de pérdidas en el hierro	300	p.u

6.1.5 Carga Fija

La carga fija P/Q es modelada a impedancia fija.

6.2 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA E-D

La simulación completa del sistema E-D en PSCAD es mostrada en la figura 30, se ilustra el sistema híbrido, compuesto por un generador diesel y un aerogenerador, la fuente de viento y la carga.

El control pitch se activa a los 5 s, a través de la señal CNT y el generador sincrónico funciona en el modo “velocidad constante”.

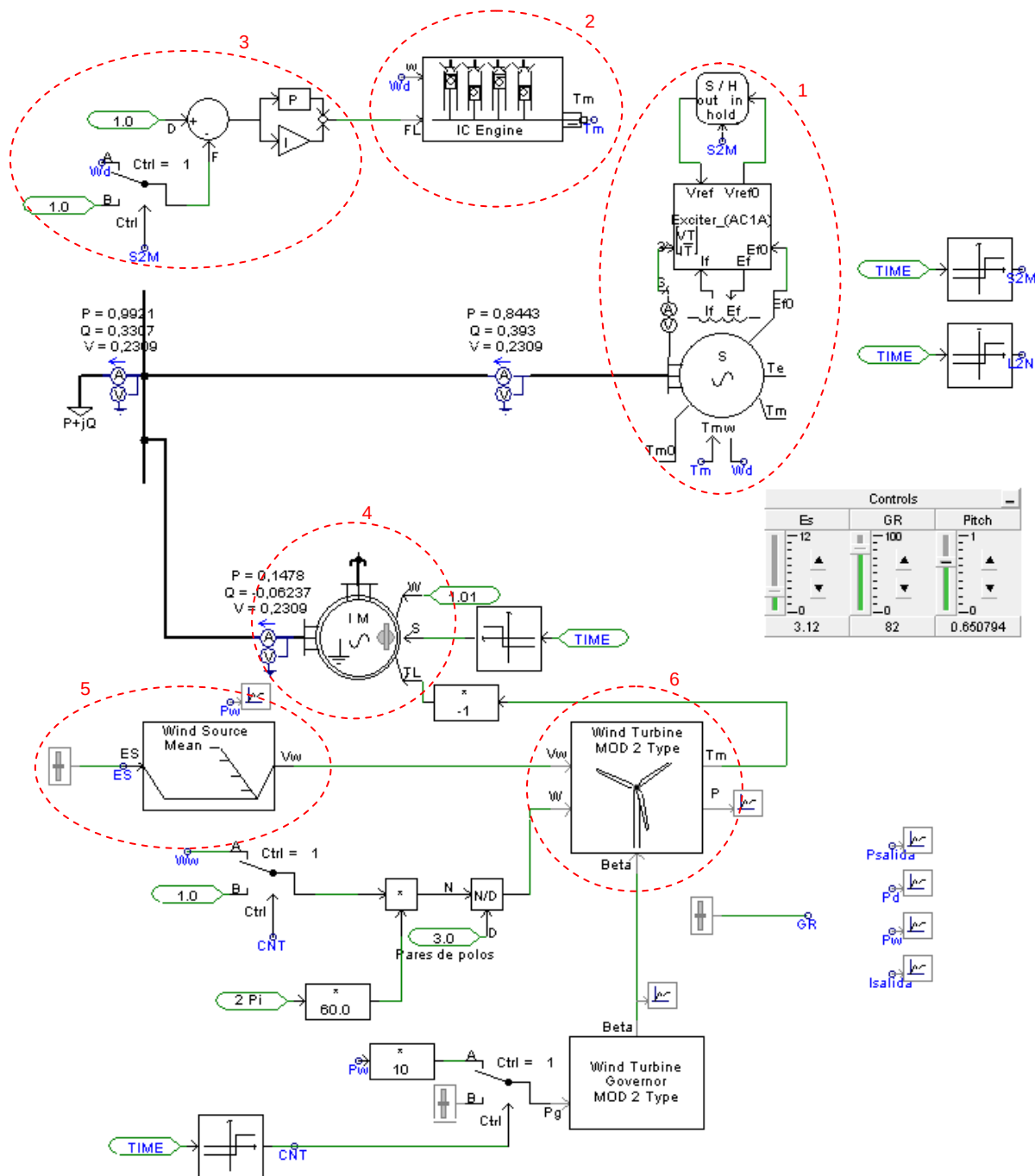
En los siguientes párrafos se presentarán los resultados de diferentes casos de estudio simulados, emulando los cambios de velocidades del viento que pueden

ocurrir en la vida real. Teniendo en cuenta que el viento es impredecible por naturaleza.

Caso 1: Viento constante

Esta situación ocurre cuando no hay variación en la velocidad del viento. En la figura 31 se muestra la respuesta de la velocidad del aerogenerador y el generador diesel, la potencia reactiva y la real, para una velocidad de viento constante de 10 m/s.

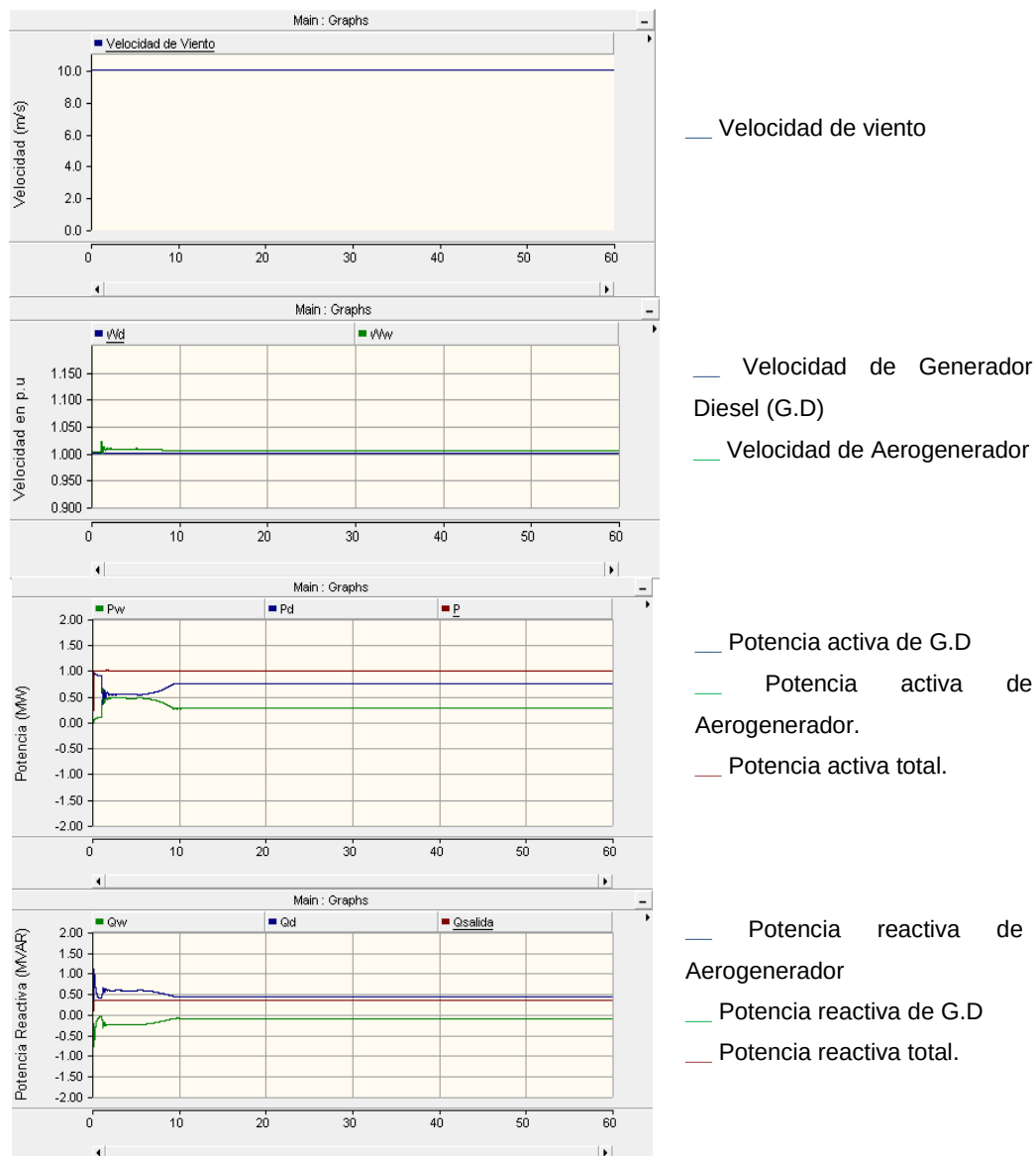
Figura 30. Simulación en PSCAD del Sistema híbrido E-D.



A continuación se enuncia cada una de las partes del modelo trabajado en la simulación del sistema híbrido E-D:

1. Generador sincrónico trifásico del grupo electrógeno
2. Motor diesel del grupo electrógeno
3. Controlador PI del sistema
4. Generador de inducción trifásico de rotor devanado
5. Fuente de viento
6. Turbina eólica

Figura 31. Respuesta del sistema E-D ante una velocidad de viento constante.



La máquina de inducción se inicia a una velocidad constante de 1.01 p.u que es ligeramente superior a la velocidad nominal de la máquina con el fin de generar potencia en vez de absorberla. Esto se presenta solamente en el momento de

arrancar la máquina. Pasado 1s cambia el modo de operación a torque que es controlado por el aerogenerador a la velocidad constante de 10 m/s; en este momento la turbina queda conectada al generador pero no esta regulada por el control pitch esto explica el transitorio. Pasados 5s el control pitch se activa y regula la potencia conservandola invariable.

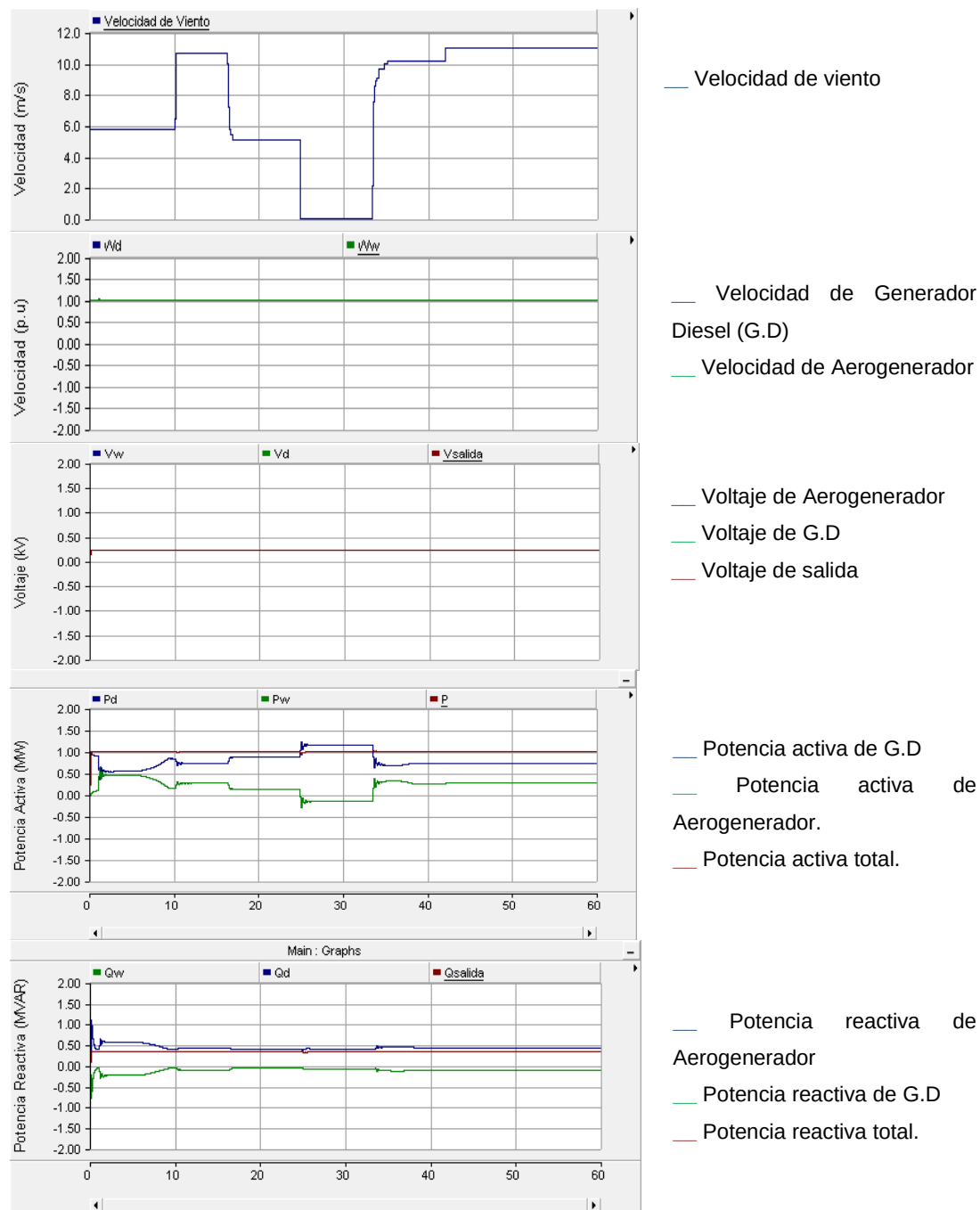
Nótese que la potencia del aerogenerador es constante debido a que no hay cambio en la velocidad del viento, por lo tanto la potencia del generador diesel también lo es. El generador diesel funciona al 70% y el aerogenerador el 30% restante, con el fin de suplir la carga total.

Caso 2: Velocidad de Viento variable

En este caso de estudio el sistema está sometido a cambios aleatorios de velocidades de viento como se muestra en la figura 32. En diferentes momentos de la simulación ocurre que, la potencia eléctrica del aerogenerador aumenta o disminuye dependiendo de la velocidad del viento, es aquí cuando el generador diesel suministra los excedentes necesarios para mantener la potencia y la tensión constantes en la carga.

Para la simulación se graficaron los siguientes parámetros: la potencia activa y reactiva, tensión, y velocidad. Ver figura 32.

Figura 32. Respuesta del sistema E-D ante cambios de la velocidad de viento



Cuando la velocidad del viento disminuye a cero, la turbina eólica tiene una respuesta negativa, lo cual indica que pasa de comportarse como generador a motor (ver figura 32 en la grafica Potencia activa), entonces el generador diesel debe suplir la carga(1MW) más la carga generada por el motor.

Como la turbina eólica tiene un generador de induccion que no produce reactivos, el generador sincrónico acoplado a la planta diesel tiene que equilibrar el consumo y generación de potencia reactiva para mantenerla constante en la carga.

La máxima potencia generada por la turbina eólica se logra a una velocidad de 11m/s, en ese instante la potencia del sistema es constante.

Si en algún momento de la simulación la velocidad del viento es superior a 11m/s se activa el control pitch para tratar de regular la potencia a la máxima potencia entregada por el generador de inducción de la turbina eólica.

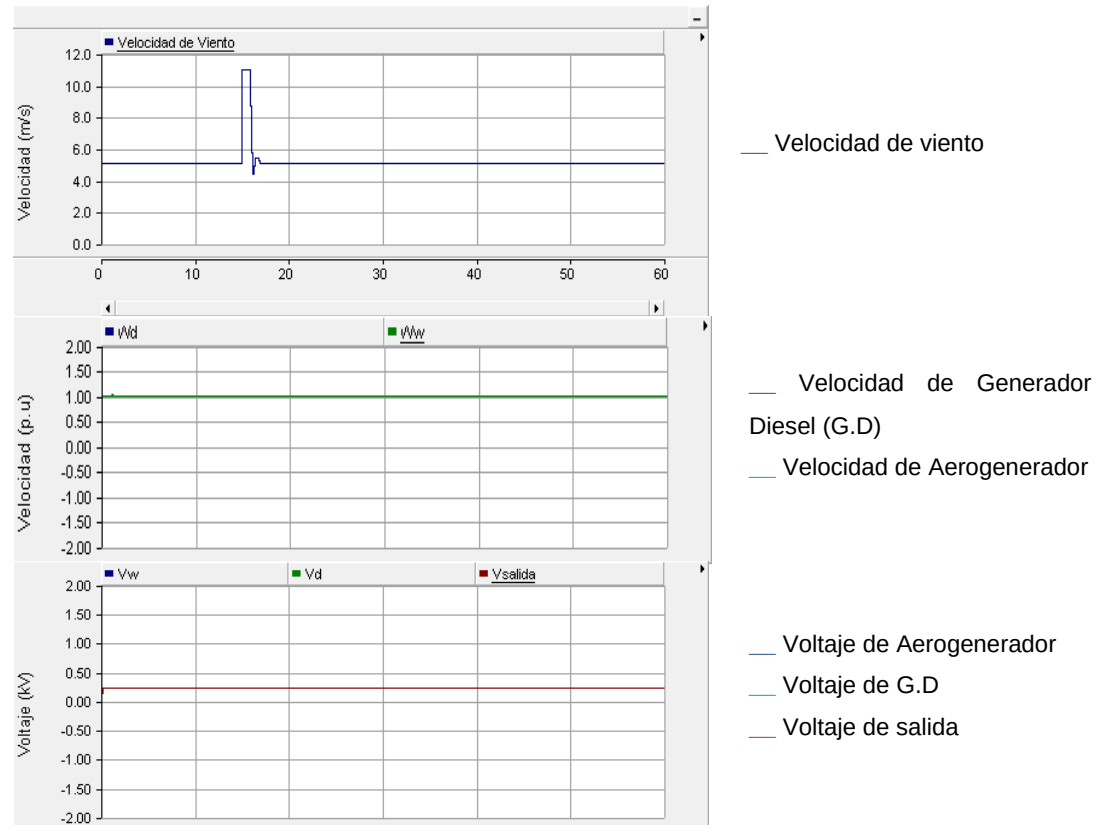
La tensión de salida en la carga es constante; por lo tanto no se presentan fluctuaciones por cambios de velocidad.

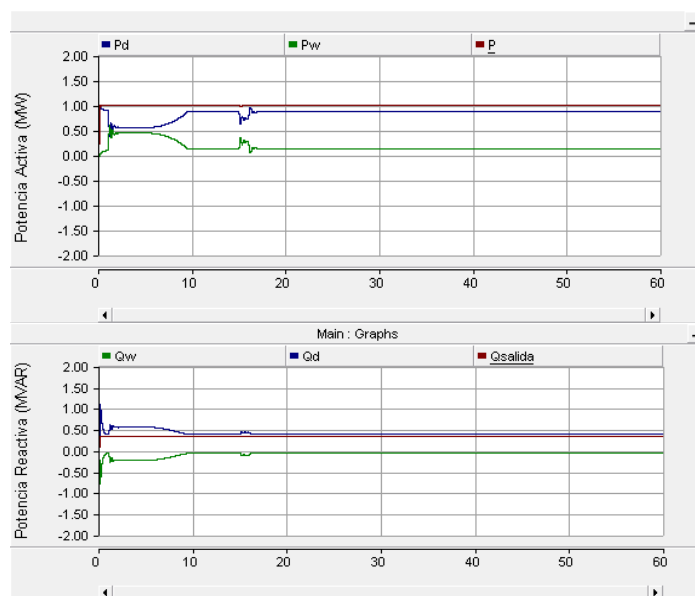
Caso 3: Ráfaga de viento

Al presentarse un cambio intempestivo en la velocidad del viento, el controlador del sistema trata manejar el generador diesel, para mantener constante la potencia de la carga durante ese intervalo de tiempo, como se ilustra en la figura 33.

La ráfaga de viento se presenta sólo por unos instantes de tiempo y luego el sistema se estabiliza en un determinado valor de velocidad.

Figura 33. Respuesta del sistema E-D ante una ráfaga de viento





— Potencia activa de G.D
 — Potencia activa de Aerogenerador.
 — Potencia activa total.

— Potencia reactiva de Aerogenerador
 — Potencia reactiva de G.D
 — Potencia reactiva total.

A lo largo de este trabajo se presentó la información que ha sido encontrada en relación a la situación actual a nivel nacional y mundial, de la aplicación y desarrollo de las energías alternativas y su respectivo impacto en el sector social e industrial.

Además se implementó el modelo de un sistema híbrido E-D, que durante el desarrollo se encontró cierto grado de dificultad con la estrategia de control a utilizar, debido a la falta de experiencia, y además la información es un poco difícil de obtener.

Por lo anterior, se hace evidente la necesidad de continuar con el estudio de estas tecnologías de generación de electricidad por medio de fuentes alternas y ahondar en el tema del sistema de control a implementar, ya que estas pueden ser de gran utilidad para futuros estudios y permite un acercamiento a este tema.

CONCLUSIONES

- Las energías renovables son una alternativa económica y medioambiental viable para la producción de electricidad. Actualmente están en creciente desarrollo en países industrializados y expandiéndose hacia las zonas en desarrollo.
- La mayor parte de las emisiones de CO₂ provienen de los combustibles fósiles, esto es consecuencia de la total dependencia que se tiene de este recurso, puntualmente del petróleo y gas natural. Uno de los sectores que más contribuye a las emisiones de carbono es la generación de electricidad, seguido en un alto porcentaje del sector industrial y transporte.
- Reducir las emisiones de gases contaminantes se ha convertido en un reto para los principales países, algunos gobiernos han creado incentivos con políticas de apoyo para el desarrollo de las energías renovables. Colombia adolece por completo de iniciativas en este sentido.
- En Colombia aún no se ha adoptado en gran escala el uso de las tecnologías renovables; actualmente se están desarrollando proyectos pilotos para el abastecimiento de energía en zonas aisladas provenientes de recursos renovables; principalmente en la guajira que es donde se cuenta con un alto potencial del recurso eólico y solar, aunque la implementación es aún precaria.
- En la mayor parte de las zonas no interconectadas del sistema Colombiano se goza de abundantes recursos renovables. Sin embargo, el

aprovechamiento de dichas alternativas es precario, y en su mayoría, el suministro eléctrico sigue haciéndose a través de plantas diesel.

- La energía eólica ha tenido un crecimiento inesperado desde finales del año 2003; aproximadamente entre el 20 % y el 27 % se incrementa con respecto al año inmediatamente anterior. Este progreso puede ser debido, entre otros, al interés por frenar el cambio climático, las políticas de incentivos gubernamentales y la madurez tecnológica a la que se ha llegado.
- En el mercado de los aerogeneradores existe una amplia gama, pero los que demuestran mejores características de funcionamiento y rendimiento son los aerogeneradores tripala, con potencias unitarias que oscilan entre los 1.5 MW y los 3 MW.
- Los parámetros más neurálgicos a la hora de maximizar la potencia mecánica aprovechada por un aerogenerador, son la velocidad del viento (por su relación cúbica) y el diámetro de las aspas, ya que pequeños incrementos de éste último ocasionarán grandes variaciones en el área barrida.
- Para estudios de energía eólica, los vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s proporcionan una buena alternativa de uso de este tipo de recurso natural para la generación de energía.
- Actualmente las turbinas más utilizadas son las de *velocidad variable*, ya que permiten una mayor eficiencia en la captura de energía, mejoran la calidad de la potencia y reducen la tensión mecánica. La operación a

velocidad fija está en desuso. Estas turbinas generalmente se acoplan a generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG).

- La energía FV es otra de las tecnologías que puede ser prometedora respecto a la generación de energía limpia; es un mercado creciente y competitivo frente a la producción convencional. El crecimiento de la energía FV sólo se conseguirá ampliando las políticas e incentivos de apoyo por parte del estado, para la utilización y adopción adecuada de la electricidad solar entre los consumidores.
- La mayoría de celdas FV son producidas de silicio monocristalino, aproximadamente el 90% de las celdas son de este tipo; porque presentan ventajas considerables en comparación con las otras tecnologías.
- Las instalaciones FV pueden ser conectadas a la red o autónomas (no conectadas a la red); en Colombia se han implementado algunos proyectos del segundo tipo; esto es principalmente para la utilización en ZNI para usos domésticos y de telecomunicaciones. Por lo tanto es necesario incursionar en la implementación de proyectos de energías renovables con ayudas financieras y del Estado, para disminuir los impactos ambientales y costos de energía convencional.
- La implementación de sistemas híbridos E-S y E-D es una alternativa para la generación de energía limpia. En ambos sistemas las ventajas principales son: la complementariedad, el ahorro, el bajo impacto ambiental y la posibilidad de cubrir zonas no interconectadas.
- El sistema híbrido E-D modelado comprueba la función que posee el generador diesel dentro de un sistema E-D, ya que es el encargado de

regular las variables del sistema, proporcionando la potencia base, y controlando la tensión y la frecuencia.

- En aplicaciones donde se acopla un aerogenerador a un sistema diesel que está en constante funcionamiento, el aerogenerador normalmente abastece un 30% de la carga ya que, por encima de este valor el generador diesel pasa a ser muy ineficiente porque estaría consumiendo la misma cantidad de combustible y generando menor potencia. Desde luego, el grupo electrógeno debe estar en capacidad de suministrar el 100% de la carga ante ausencias prolongadas del viento.
- En cargas variables en el tiempo cuando se presenta una baja demanda de potencia y hay grandes velocidades de viento, el excedente de potencia debe ser utilizado en cargas secundarias como calefacción de casas, refrigeración, desalinización del agua, entre otras.
- La penetración instantánea y la penetración media son dos índices importantes al momento de elegir la configuración que se va a emplear en un sistema híbrido, ya que estos permiten valorar la viabilidad económica y la complejidad del sistema.
- Los principales inconvenientes a la hora de modelar este tipo de aplicaciones es ajustar el controlador, normalmente se hace con ensayos de prueba y error por lo tanto, la simulación es la que toma mayor tiempo para obtener resultados satisfactorios.
- El control PI utilizado en la simulación podría mejorar el tiempo de respuesta ante las variaciones del viento colocando un controlador PID.

TRABAJOS FUTUROS

La experiencia en Colombia en realización de proyectos eólicos híbridos es mínima, por lo tanto como no se tiene un conocimiento apropiado es importante continuar con los estudios e investigaciones en este tema; ya que esta es una alternativa para la generación de energía limpia. En ambos sistemas las ventajas principales son: la complementariedad, el ahorro, el bajo impacto ambiental y la posibilidad de cubrir zonas no interconectadas.

Como puede apreciarse, esta temática es interesante, pero hasta ahora prácticamente ha sido inexplorada, lo cual justifica y hace pertinente el proyecto desarrollado en el trabajo de grado, el cual intenta ser un aporte para futuras generaciones.

Es recomendable seguir realizando la gestión bibliográfica iniciada sobre las energías renovables con la ayuda de paper, libros, artículos entre otros; y de esta forma consolidar y aumentar la información que se tiene de este tema, con el fin de que sirva como una herramienta para próximos trabajos y estudios .

Se sugiere, en el tema de implementación de sistemas híbridos la posibilidad de hacerlo acoplando un panel solar, de tal forma que el diseño sea *Eólico-Diesel-Solar FV* y de esta forma se puede garantizar la producción de energía limpia y tratar de utilizar lo menos posible el grupo electrógeno para minimizar los costos y el consumo de combustible.

También es viable, y queda abierto para otros trabajos de grado e investigación el diseño e implementación del control de un sistema híbrido *E-D* con carga variable

en el tiempo, esto debido a que todas las instalaciones eléctricas poseen variaciones de la carga en el tiempo.

Dado el alcance del trabajo de grado realizado, es factible modelar un sistema híbrido de alta penetración, donde conste de un panel FV y una turbina eólica; sólo en casos de emergencia sea necesario recurrir como respaldo a un generador diesel.

Finalmente, se podría implementar un sistema híbrido *E-D* o *E-S*, a pequeña escala para realizar estudios de laboratorio, obtener nuevos resultados y avanzar en este tema.

BIBLIOGRAFÍA

ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. England: John Wiley & Sons, 2005.

ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (ASIF). Historia de la energía solar fotovoltaica. [En línea]. Madrid: El Autor, 2008. <Disponible en: http://www.asif.org/files/Historia%20FV_web_resumida_2008.pdf> [consulta: 04 Agos. 2008].

ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE ENERGÍAS RENOVABLES (APPA). Energías renovables. [En línea]. España: El Autor, 2005. <Disponible en: <http://www.appa.es/03renovables04/03renovables1-4-7.htm>> [Consulta: 06 Sep. 2008]

ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA (AEE). Eólica 2008, anuario del sector: análisis y datos. [Documento en formato PDF]. España: El Autor, 2008.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA UNESA. [En línea] España: El Autor, 2009. <Disponible en: <http://www.unesa.es/index.html>> [consulta: 14 Sep.2008]

ASOCIACIÓN EUROPEA DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA (EPIA) y GREENPEACE. Solar generation V – 2008: Electricidad solar para más de mil millones de personas y dos millones de puestos de trabajo para el año 2020. [En línea]. Bélgica: Patricia Philbin, 2008. p.27. <Disponible en: http://www.lageneraciondelsol.com/documentos/biblioteca/1920081625511_Solar-Generation-V-2008.pdf> [consulta: 1 May.2009]

BARING-GOULD, E. Ian. NREL National Renewable Energy Laboratory. s.l: Integration of wind into diesel power systems. Golden, Colorado, USA: NREL, 2008. p5.

BTM CONSULT APS. International wind energy development world market update 2007. [En línea]. s.l: El Autor, 2007. <Disponible en: <http://www.btm.dk>> [consulta: 26 Ene.2009]

BUCKLEY, Lila. Las emisiones de dióxido de carbono causadas por la actividad humana, el motivo principal del calentamiento del planeta y del cambio del clima, alcanzan un récord histórico. [En línea]. s.l: El Autor, 2004. <Disponible en: <http://www.terra.org/articulos/art01121.html>> [consulta: 21 Oct. 2009]

BURTON, Tony y otros. Wind energy: handbook. England: John Wiley & Sons, 2002.

COMUNIDAD DE MADRID. Aerogenerador. [En línea]. Madrid: El Autor, s.f. <Disponible en: <http://www.madrid.org>> [consulta: 21 Mar.2009]

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. Denamark. [En línea]. s.p.i. <Disponible en: <http://www.windpower.org>> [consulta: 28 Feb.2009]

DROUILHET, Steve. NREL National Renewable Energy Laboratory: High Penetration AC Bus Wind-Diesel Hybrid Power Systems. Golden, Colorado, USA: NREL, 2008.

ELECTRICASAS. Preguntas frecuentes sobre grupos electrógenos. [En línea]. s.p.i. <Disponible en: <http://images.google.com.co/images?q=grupo+electrogeno>> [consulta: 01 Mar.2009]

ENERGÍAS RENOVABLES. Mitsubishi Corporation compra a Acciona el 34% de la mayor planta fotovoltaica del mundo. En: Energías Renovables el periodismo de las energías limpias. [En línea]. s.l: El Autor, 2009. <Disponible en: <http://www.energiasrenovables.com/paginas/Contenidosecciones.asp?ID=15&Cod=16366&Tipo=&Nombre=Solar%20fotovoltaica>> [Consulta: 12 Mar.2009]

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION(EIA). International Energy annual 2005. Projections: EIA. EE.UU: World Energy Projections Plus, 2008.

FORO DE NORMALIZACIÓN Y CONTEXTO NACIONAL EN ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA (Bogotá): . Memorias. [Documento en formato PDF]. Bogotá: ICONTEC; UPME, s.f.

GALLÓN VALENCIA, Hernán. Grupos electrogenos diesel. Medellín: UPB, 1994. 320p. (Nabla – Delta; No.31)

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). US and China in race to the top of global wind industry. [En línea]. Brussels: El Autor, 2009. <Disponible en: http://www.gwec.net/fileadmin/documents/PressReleases/PR_stats_annex_table_2nd_feb_final_final.pdf> [Consulta: 30 Mar.2009]

HANSEN, L. H. y otros. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines. Dinamarca: Riso National Laboratory, 2001.

KUMAR AMIT, Jindal; ANIRUDDHA M., Gole y DHARSHANA, Muthumuni. Modeling and performance analysis of an integrated Wind/Diesel Power System for Off-Grid Locations. National Power Systems Conference, 2008.

KYOSEMI. Spherical Photovoltaic Solar Cell. [En línea]. s.l: El Autor, 2007. <Disponible en: <http://www.kyosemi.co.jp/product/pro_ene_sun_e5.html> [consulta: 15 Feb.2009]

MADRID SOLAR. Guía de la energía solar. Madrid: Industrias Graficas el Instalador, 2006.

MILLER, N. y YE, Z. Wind/Diesel power systems basics and examples. [En línea]. Colorado: National Renewable Laboratory, 2007. <Disponible en: www.nrel.gov> [consulta: 06 Jun.2009]

PATEL, Mukund R. Wind and solar power systems. [Documento en formato PDF]. New York: CRC Press LLC, 1999.

PEREIRA LOBITO. Galeria. [En línea]. Portugal: El Autor, 2008. <Disponible en: <http://www.flickr.com/photos/lobitopereira/2278731599/>> [consulta: 1 May.2009]

PIGGOTT, Hugh. Windpower workshop. EE.UU: British Wind Energy Association; Centre for Alternative Technology Publications, 2000.

PSCAD/EMTDC. Power system simulation software: user's manual, EMTDC versión 4.2. Canadá: El Autor, 2005.

RETSCREEN INTERNATIONAL. Análisis de proyectos fotovoltaicos: curso de análisis de proyectos de energía limpia. [En línea]. Canadá: Retscreen, 2004. <Disponible en: http://www.etscreen.net/es/t_training.php> [consulta: 10 Sep. 2008].

RETSCREEN INTERNATIONAL. Clean energy decision support centre; Clean energy project analysis: photovoltaic project analysis chapter. [En línea]. Canadá. Retscreen, 2004. <Disponible en: <http://www.etscreen.net/ang/home.php>> [consulta: 10 Sep. 2008]

RISØ NATIONAL LABORATORY. Presentation at a visit by Danida and IFU at Risø National Laboratory. s.l: El Autor, 2005.

SADOUN SOLAR SALES. Solar & Wind Power Generation Products. [En línea]. Ohio: El Autor, 2008. <Disponible en: www.sadoun.com/solar/index.htm> [consulta: 10 Abr. 2009]

SIMÕES, M. G. y otros. Electrical model development and validation for distributed resources. [Documento en formato PDF]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2007.

STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY BP. Global fossil CO₂ emissions for 2006. En: Netherlands Environmental Assessment Agency. [En línea]. Netherlands: International Energy Agency, 2007. <Disponible en: <http://www.pbl.nl/en/dossiers/Climatechange/moreinfo/Chinanowno1inCO2emissionsUSAinsecondposition.htm>> [consulta: 20 Nov.2008]

SUNRGI. Technology. [En línea]. s.l: El Autor, 2008. <Disponible en: <http://www.sunrgi.com/increased-light-gathering-area.html>> [consulta: 15 Feb. 2009]

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME) / INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Atlas

de radiación solar de Colombia. [En línea]. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2005. <Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>> [consulta: 12 Ene. 2009]

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2006.

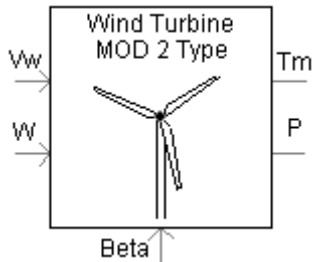
----- . Energías renovables: descripción, tecnologías y usos finales. [En línea]. s.l. Subdirección de Planeación Energética, s.f. <Disponible en: http://www.upme.gov.co/Cartilla_virtual/Ener_Alterna.swf> [consulta:19 May. 2008]

----- . Información del Plan Energético Nacional. En: Contexto y Estrategias 2006-2025. Bogotá: el Autor, 2005.

ANEXOS

Anexo A. Descripción de modelos

AEROGENERADOR



Descripción

Este componente modela un Aerogenerador. Las variables de entrada son la velocidad del viento **Vw**, la velocidad mecánica a la cual gira la máquina conectada a la turbina **W** y ángulo de paso o “pitch angle” de las palas de la turbina **Beta**. Tm y P son las variables de salida, torque y potencia respectivamente

Entradas:

Vw: Velocidad de viento (valor positivo) [m/s]

W: Velocidad mecánica de la máquina [rad/s]

Beta: Ángulo de paso o “pitch angle” [°]

Salidas:

Tm: Torque de salida de la turbina [p.u.]

P: Potencia de salida de la turbina [p.u.]

Las ecuaciones que representan este modelo son las siguientes:

$$P = 0.5\rho C_p W_v^3 A_s$$

Donde:

P = Potencia Mecánica (Watts)

ρ = Densidad de Aire Seco $\left(\frac{Kgr}{m^3}\right)$

W_v = Velocidad del viento $\left(\frac{m}{s}\right)$

$A_s = \text{Areá de barrido del rotor (m}^2\text{)}$

El modelo MOD-2 del generador de turbina eólica, que fue utilizado en la simulación determina el torque de salida de la turbina (T), dada la velocidad del viento (W_v), la velocidad de la máquina (W) y el ángulo ángulo de paso (β). La dinámica de las palas se aproxima a las siguientes ecuaciones:

Velocidad del buje: $w_H(W) = \frac{W}{GR}$

Velocidad específica: $\gamma(W, W_v) = \frac{W_v}{w_H(W)}$

Coeficiente de potencia: $C_p(W, \beta) = \frac{1}{2}(\gamma(W) - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\gamma(W)}$

Potencia de salida en p.u= $P(W, \beta) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot W_v^3 \cdot A_s \cdot C_p(W, \beta) \cdot G_{eff}}{1000000 \cdot G_{MVA}}$

Torque en p.u= $T(W, \beta) = \frac{P(W, \beta) \cdot W_{RAT}}{W \cdot pp}$

Donde:

$W = \text{Velocidad mecánica de la máquina en(rad/s)}$

$GR = \text{Relación de transmisión de la caja multiplicadora}$

$\beta = \text{Ángulo de paso en grados}$

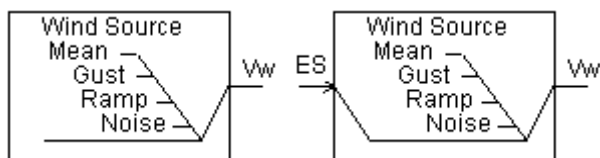
$G_{eff} = \text{Eficiencia de la caja multiplicadora}$

$G_{MVA} = \text{Potencia nominal de la máquina en MVA}$

$W_{RAT} = \text{Velocidad nominal del generador (rad/s)}$

$pp = \text{pares de polos}$

FUENTE DE VIENTO



Descripción

Este componente modela la velocidad del viento disponible para el aerogenerador.

Entradas:

ES: Señal externa representando la velocidad del viento [m/s]

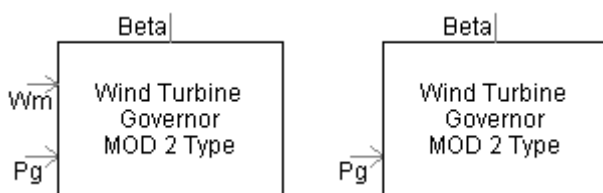
Salida:

Vw: Velocidad de viento disponible para el aerogenerador [m/s]

La entrada externa **Es** puede ser utilizada para introducir cualquier tipo de variación del viento que no puede ser definido dentro del componente. El usuario tiene la opción de habilitar o deshabilitar esta opción.

Además este modelo simula ráfagas, rampas, ruidos del viento.

CONTROLADOR DE POTENCIA MECÁNICA



Descripción

Este componente modela el regulador de ángulo de paso ó “Pitch Angle” del aerogenerador. Las entradas de este modelo son la velocidad mecánica de la máquina **Wm** y la potencia de salida de la máquina **Pg**. La salida es el ángulo de paso de la turbine.

Entradas:

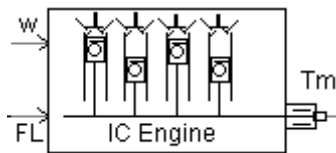
Wm: Velocidad mecánica de la máquina [rad/s]

Pg: Potencia de salida de la máquina basado en la potencia nominal de la máquina [p.u.]

Salida:

Beta: Ángulo de paso ó “Pitch Angle” [°]

MOTOR DIESEL



Descripción

Este componente modela un motor de combustión interna de 1 a 12 cilindros, con dos o cuatro tiempos. Dando una transmisión mecánica mediante una entrada de control de velocidad **w** y un factor de admisión de combustible **FL**, un torque de salida del eje mecánico **Tm** es generado según un ángulo polar / curva de torque. La conexión de Tm puede ser conectado directamente al torque mecánico de entrada en cualquier maquina.

Entradas:

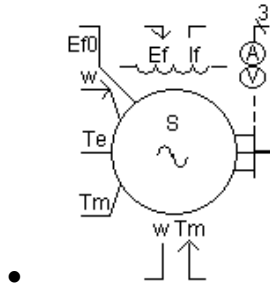
w: Velocidad del eje mecánico. Control de velocidad [pu].

FL: Admisión de combustible en el motor. Este valor es proporcional al torque mecánico de salida Tm [pu].

Salida:

Tm: Salida de torque mecánico [pu].

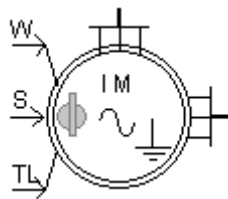
GENERADOR SINCRÓNICO



Descripción

- Este componente incluye una opción del modelo de dos devanados amortiguadores en el eje Q y por lo tanto, puede ser utilizado como una máquina con rotor de polos lisos o salientes. La velocidad de la máquina puede ser controlada directamente por la fijación de un valor positivo **w** en la entrada de la máquina, o un torque mecánico a la entrada de **Tm**.

GENERADOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

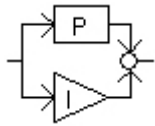


Descripción

El generador de inducción de rotor devanado puede ser operado en dos “control de velocidad” o “control de torque”.

Normalmente, la máquina se inicia en el modo de control de velocidad con la **W** de entrada nominal ajustado a la velocidad por unidad y luego cambia al control de torque, alcanzando el estado estable.

CONTROLADOR PI



Descripción

Esta función realiza un control proporcional integral (es decir, la salida es la suma de las ganancias proporcional e integral de la señal de entrada). Ya sea rectangular o trapezoidal puede ser utilizada para el cálculo en el dominio de tiempo de la función integral.

Anexo B. Aplicaciones de los generadores Diesel como fuente primaria en Colombia.

En Colombia existe un Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas (FAZNI) el cual, tiene como objetivo primordial financiar los planes, programas y proyectos de inversión en infraestructura energética en las ZNI propuestos y presentados por las entidades territoriales, por las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica y por el Instituto de Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE).

En este anexo se mencionarán algunos casos, que sirven como ejemplo de la utilización de generadores diesel para la electrificación en ZNI.

El primero de ellos esta ubicado en el departamento de Nariño, y esta dirigido a la población de la cabecera municipal de Santa Bárbara de Iscuandé. El objeto del proyecto está enfocado en el mejoramiento del sistema de generación de energía eléctrica. En este proyecto utilizan dos unidades de generación de energía eléctrica del tipo *Prime*, con una capacidad continua mayor o igual a 300kW cada una, con todos sus equipos y sistemas auxiliares mecánicos, eléctricos, electrónicos, y el diseño de construcción de las obras civiles y estructuras para la instalación de dichos equipos en la Central de Generación Diesel de Santa Bárbara de Iscuandé.

El segundo proyecto se desarrolló para la central de generación Diesel de Unguía, Departamento de Chocó; con el mismo fin de mejorar la capacidad de generación eléctrica en la cabecera de este municipio.

Los generadores diesel de ambos proyectos funcionan como fuente principal o única de energía, lo que implica un servicio continuo o por períodos de tiempos prolongados⁴⁵.

⁴⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Proyectos Fazni: planes programas y proyectos. Colombia. [En línea]. Bogotá: El Autor, 2005. <Disponible en : http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=50&id_seccion=882&id_subcategoria=269&id_categoria=71> [consulta: 26 enero 2009]

Anexo C. Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es una característica importante para incorporar en sistemas de energía renovables, en particular en aquellos diseñados para funcionamiento autónomo. Aunque muchos de los sistemas eléctricos actuales operan eficazmente sin almacenamiento, la utilización de formas sencillas, económicas y efectivas de almacenar electricidad contribuye a incrementar su confiabilidad y eficiencia. Esto puede mejorar perceptiblemente la disponibilidad de carga, un requisito clave para cualquier sistema de potencia.

En el presente y el futuro de las tecnologías de almacenamiento de energía que pueden ser considerados para sistemas autónomos fotovoltaicos ó de energía eólica, las principales alternativas tecnológicas se muestran en la siguiente tabla, presentando sus características más relevantes:

Principales Tecnologías de Almacenamiento			
Almacenamiento	Característica	Aplicaciones	Ventajas
Bombeo de Agua.	Se utiliza para bombear agua desde un tanque inferior a un tanque superior.	En centrales eléctricas. Es el más usado en el mundo. . Existen ~ 90 GW, en operación en el mundo	Manejo de energía, control de frecuencia y provisión de reservas.
CAES: Compressed Air Energy Storage	Es una planta de generación con turbina de gas que consume menos del 40% de gas que una turbina convencional para producir la misma energía.	Motores de propulsión, generación de energía, usa el aire con ~ 1/3 de gas para producir EE en horas de punta.	Capacidad y bajo costo/ Desventajas: Requerimientos de sitio y gas combustible
Flywheel (Volante de Inercia)	Almacenamiento de energía en forma mecánica, utilizando la inercia generada por la masa de una volante en	Se utiliza como dispositivos para suavizar el funcionamiento de instalaciones generadoras de	Almacenamiento de energía por largos períodos, con pérdidas muy bajas, libre de mantenimiento,

	movimiento.	energía eléctrica mediante energía eólica y energía fotovoltaica.	limpio, silencioso. Poco peso.
SMES	La energía eléctrica se almacena circulando corriente d-c, en una bobina superconductora contenida en recipientes de alto aislamiento térmico e inmersas en un líquido muy frío (Helio)	Estabilidad en sistemas de transmisión. Almacenamiento de energía para solucionar problemas de calidad de la potencia. Control del voltaje. Control de la frecuencia.	Silenciosos, eficientes, disponibles. Tiempo de respuesta alto.
Ultra – Capacitores	Almacenan energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos.	Estabilidad de sistemas de transmisión Subestaciones Calidad de potencia. Atención de picos de demanda.	Menor tamaño físico. Carga y descarga muchísimo más rápido. No degradación de celdas.
Baterías avanzadas:			
Baterías de flujo (Flow Batteries)	Regenesys Flow Battery Vanadium Redox Zinc - Bromine	En aplicaciones de alta potencia como para alta energía.	Alta capacidad, pero tiene baja densidad de energía.
Baterías Regenesys (Regenerativas)	Son celdas de combustible regenerativas que permiten reacción electroquímica		Se requieren arreglos serie paralelo, para obtener el voltaje y la corriente deseada

C.1 Bombeo de agua

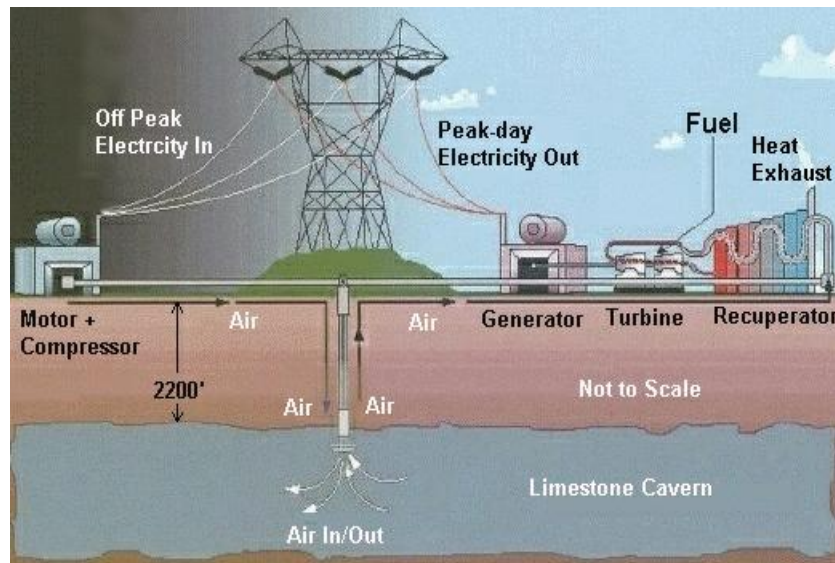
Consiste básicamente en bombear agua hasta un depósito ubicado a una cierta altura para almacenarla como energía potencial, que puede ser aprovechada a medida que el agua baja en el campo gravitacional de la tierra accionando una turbina, que acoplada a un generador, permite obtener electricidad. Se utiliza para suavizar la carga de generación diaria, bombeando agua al depósito durante horas valle (de baja demanda), usando los excedentes disponibles en el sistema eléctrico. Durante las horas punta (de alta demanda), el agua almacenada se puede utilizar para generación hidroeléctrica, constituyéndose así en una reserva de alto valor por su capacidad de respuesta rápida para cubrir picos transitorios de demanda.

La eficiencia global de los sistemas hidroeléctricos bombeados bien diseñados está en el rango de 72 a 81%. Actualmente es la forma más rentable de almacenamiento de energía. El principal problema es que requiere generalmente dos depósitos ubicados en cotas diferentes (aprox. 100 m) y a menudo tiene asociados considerables costos de capital.

C.2 CAES (Almacenamiento de energía con aire comprimido)

Los sistemas CAES utilizan la energía compresiva asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos como cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos que están geológicamente contenidos. Como se ilustra en la figura1. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire durante horas valle. Durante horas punta el aire comprimido se utiliza para producir potencia al expandirlo en una turbina de gas con relativamente alta eficiencia.

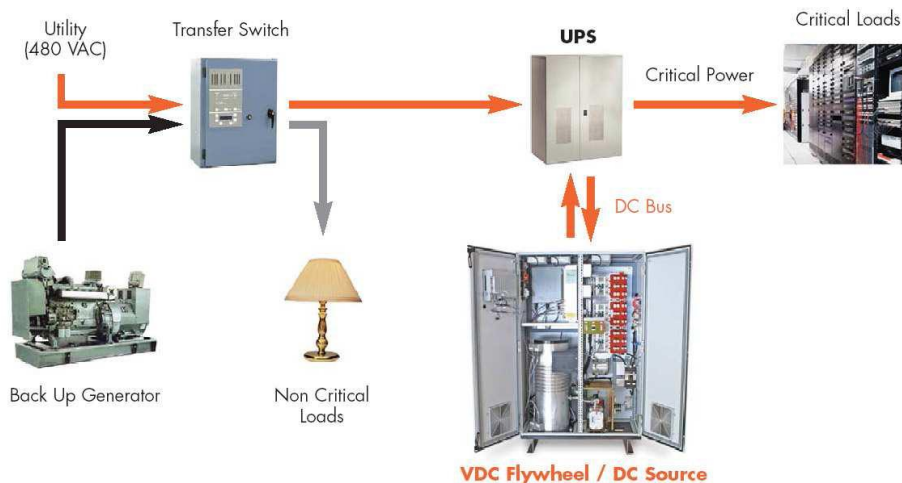
Figura C1. Esquema de almacenamiento por aire comprimido



C.3 Flywheel (Volante de Inercia)

La inercia mecánica es la base de este método de almacenamiento. Un disco pesado que rota es acelerado por un motor eléctrico, que actúa como generador en reversa, retrasando el disco y produciendo electricidad. La electricidad se almacena como energía cinética.

Figura C2. Esquema de un sistema eléctrico con volante de inercia



La fricción se debe mantener al mínimo para prolongar el tiempo de almacenamiento. Esto se logra colocando la rueda volante en el vacío y usando cojinetes magnéticos, lo cual hace que el método sea costoso.

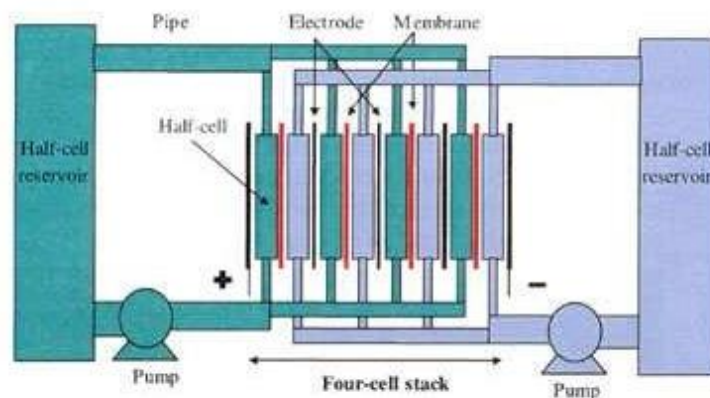
Cuando hay velocidades más grandes de la rueda permiten mayor almacenamiento pero requieren materiales fuertes (tales como acero) o materiales compuestos para resistir la fuerza centrífuga. Se está investigando el uso de nanotubos de carbón como material de la rueda.

C.4 Baterías

En las baterías la energía eléctrica es almacenada (cargada) o liberada (descargada) mediante reacciones electroquímicas que transportan electrones a los electrodos (cátodo y ánodo), conectados por un electrolito (p.e. soluciones líquidas, polímeros conductores sólidos, gel), para llevar cabo reacciones específicas de reducción/oxidación (redox). Frecuentemente se utilizan catalizadores para acelerar las tasas de reacción a niveles aceptables. Durante la carga, la energía se almacena químicamente al incrementarse la composición de

iones cargados contenidos en el electrolito a través de reacciones redox selectivas en los electrodos que consumen o producen electrones.

Figura C3. Esquema de funcionamiento de una batería



Durante la descarga, la energía se libera por transporte de iones, causando reacciones redox que ocurren de forma inversa en los electrodos. Luego el ánodo (electrodo oxidante) y el cátodo (electrodo reductor) cambian de posición entre carga y descarga.

La electricidad se produce en CD y para aplicación en centrales de potencia normalmente se convierte a CA mediante un inversor. Las baterías son generalmente costosas, requieren mucho mantenimiento y tienen vida útil limitada.

C.5 SMES (Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos)

Los sistemas SMES almacenan energía electromagnética con pérdidas insignificantes mediante la circulación de corriente continua a través de bobinas superconductoras, enfriadas criogénicamente. La energía almacenada se puede lanzar de nuevo a la red descargando la bobina. El sistema utiliza un inversor/rectificador para transformar energía de CA a CD o viceversa. El

inversor/rectificador presenta pérdidas de energía cercanas al 2-3% en cada dirección. Los SMES presentan menores pérdidas de electricidad en comparación a otros métodos de almacenamiento de energía. El alto costo de los superconductores es la limitación principal para el uso comercial de este método de almacenamiento de energía. Debido a las necesidades energéticas de refrigeración y a los límites en la energía total capaz de ser almacenada, los SMES se utilizan actualmente para el almacenamiento de energía por breves periodos de tiempo.

Existen SMES de varias escalas:

- Micro SMES: Capacidad hasta 1 MWh. Resuelve problemas comerciales de calidad de energía. Se utiliza para cargas de procesos grandes y críticos. Su costo fluctúa entre un millón y dos millones de dólares.
- SMES de mediana escala: Ofrece regulación y estabilidad de red para las empresas de distribución de energía.
- SMES de gran escala: Capacidad desde 10 MWh hasta 10000 MWh. Para nivelación de carga y estabilidad de red. Permite rápido intercambio de potencia activa y reactiva con la red de la empresa eléctrica. Existe un importante proyecto de desarrollo en Japón (20 MWh).

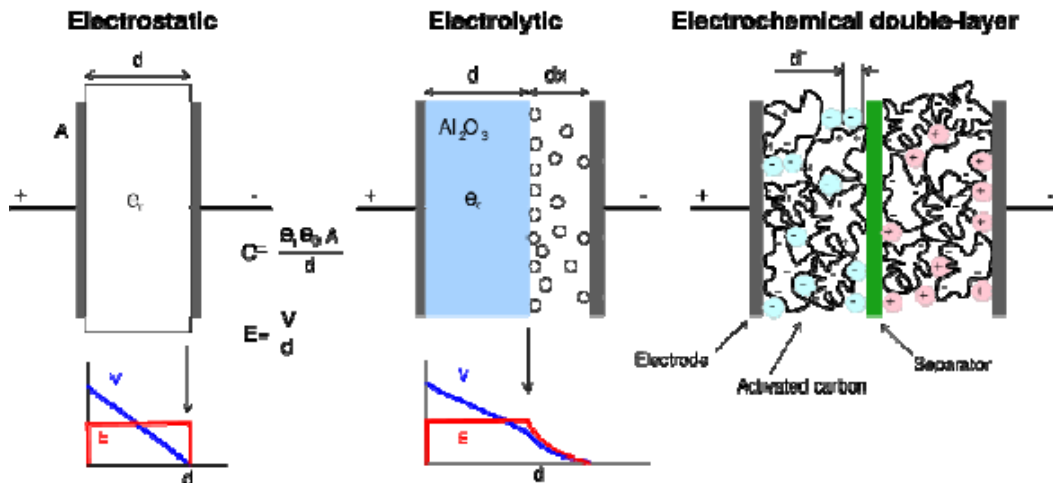
Aplicaciones de los SMES:

- estabilidad en sistemas de transmisión.
- almacenamiento de energía para solucionar problemas de calidad de la potencia.
- control del voltaje.
- control de la frecuencia.

C.6 Supercondensadores

Los supercondensadores almacenan energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Los supercondensadores tienen la capacidad de ser cargados y descargados en brevísimos periodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante interrupciones de suministro de poca duración.

Figura C4. Tipos de supercondensadores



El almacenamiento de energía por supercondensadores tiene varias ventajas sobre las otras tecnologías:

- la eficiencia del ciclo de carga y descarga es elevado, alrededor de un 95%.
- mucho más tiempo de vida útil, hasta unos 30 años.
- el tiempo de carga y descarga es muy corta, lo que lo hace atractivo para el suministro de gran potencia en periodos de tiempo cortos.
- No posee partes móviles en el sistema principal

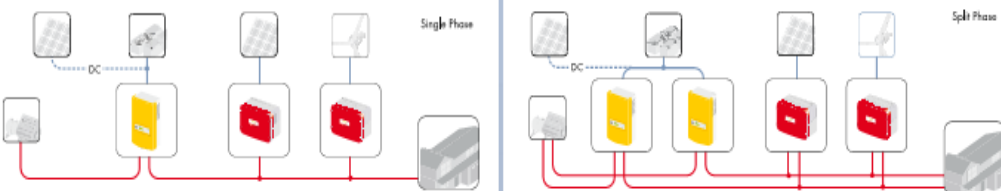
El costo principal de este sistema de almacenamiento, es mantener la bobina por debajo de temperatura crítica superconductora.

Anexo D. Características de Inversores

Los inversores facilitan y hacen más sencilla la implementación de sistemas aislados. En el mercado existen diferentes fabricantes de inversores, los cuales ofrecen equipos para conexión aislada y conectada a la red.

SMA es una de las compañías líderes en este campo, presenta una gran gama de inversores para las diferentes necesidades. Uno de ellos son los sistemas Sunny Island que pueden utilizarse en redes aisladas monofásicas y trifásicas y tiene la opción de ampliar el sistema en cualquier momento, además en instalaciones de energía solar, eólica o hidráulica, pueden acoplarse tanto en el lado de CA como en el lado de CC, los equipos garantizan un abastecimiento eléctrico fiable y de alta calidad, y son extremadamente silenciosos. Gracias a su extraordinaria resistencia a la sobrecarga y a su capacidad de soportar altas temperaturas ambiente, Además, son fáciles de instalar y ofrecen una excelente relación de costo-beneficio.

En la siguiente figura se ilustran los datos técnicos de los inversores Sunny Island 3324/4248/ 4248U

	SI 3324	SI 4248	SI 4248U
Valores de salida			
Tensión nominal CA (ajustable)	230 V (202 - 253 V)	230 V (202 - 253 V)	120 V (105 - 132 V)
Frecuencia nominal (ajustable)	50 Hz (45 - 55 Hz)	50 Hz (45 - 55 Hz)	60 Hz (55 - 65 Hz)
Potencia constante de CA a 25 / 45 °C	3300/2300 W	4200/3400 W	4200/3400 W
Potencia constante de CA a 25 °C durante 30 / 5 / 1 min	4200/4400/5000 W	5400/6200/7000 W	5400/6200/7000 W
Corriente nominal de CA	14,5 A	18 A	35 A
Corriente máx.	70 A (por 100 ms)	100 A (por 100 ms)	140 A (por 5 s)
THD CA	< 3 %	< 3 %	< 3 %
Factor de potencia	-1 a +1	-1 a +1	-1 a +1
Valores de entrada			
Tensión de entrada	230 V (172,5 - 250 V)	230 V (172,5 - 250 V)	120 V (80 - 150 V)
Frecuencia de entrada	50 Hz (40 - 60 Hz)	50 Hz (40 - 60 Hz)	60 Hz (54 - 66 Hz)
Corriente máx. de CA	56 A (2 - 56 A)	56 A (2 - 56 A)	56 A (2 - 56 A)
Potencia máx. de entrada	12,8 kW	12,8 kW	6,7 kW
Datos de la batería			
Tensión de la batería (rango)	24 V (21 - 32 V)	48 V (41 - 63 V)	48 V (41 - 63 V)
Corr. de carga máx. de la batería	140 A	100 A	100 A
Corr. constante de carga	104 A	80 A	80 A
Capacidad de la batería	100 - 6000 Ah	100 - 6000 Ah	100 - 6000 Ah
Regulación de carga	IU ₀ U con carga automática plena y de compensación	IU ₀ U con carga automática plena y de compensación	IU ₀ U con carga automática plena y de compensación
Rendimiento/consumo de potencia			
Rendimiento máx. (típ.)	94,5 %	95 %	95 %
Consumo característico sin carga (standby)	22 W (< 4 W)	22 W (< 4 W)	22 W (< 4 W)
Grado de protección DIN EN 60529	IP30	IP30	IP30
Certificados y autorizaciones	CE	CE	UL / ETL
Protección del equipo	Cortocircuito, sobrecarga, sobretensión	Cortocircuito, sobrecarga, sobretensión	Cortocircuito, sobrecarga, sobretensión
Peso y dimensiones			
Ancho / alto / fondo (mm)	390 / 590 / 245	390 / 590 / 245	390 / 590 / 245
Peso	39 kg	39 kg	39 kg
Condiciones ambientales			
Temperatura ambiente	-25 hasta +50 °C	-25 hasta +50 °C	-25 hasta +45 °C
Garantía (UE)	5 años	5 años	5 años
Accesorios			
Sensor exterior de temperatura de la batería	Incluido	Incluido	Incluido
Administrador del generador "GenMan"	Opcional	Opcional	Opcional
			

Todas las soluciones Sunny Island utilizan en primer lugar la energía solar fotovoltaica ya que se encuentra disponible en todo el mundo. Además, los

sistemas FV son adaptables y presentan un bajo desgaste. También se puede combinar con grupos diesel para el abastecimiento de emergencia.

Algunos casos típicos que ya se encuentran implementados se muestran a continuación:

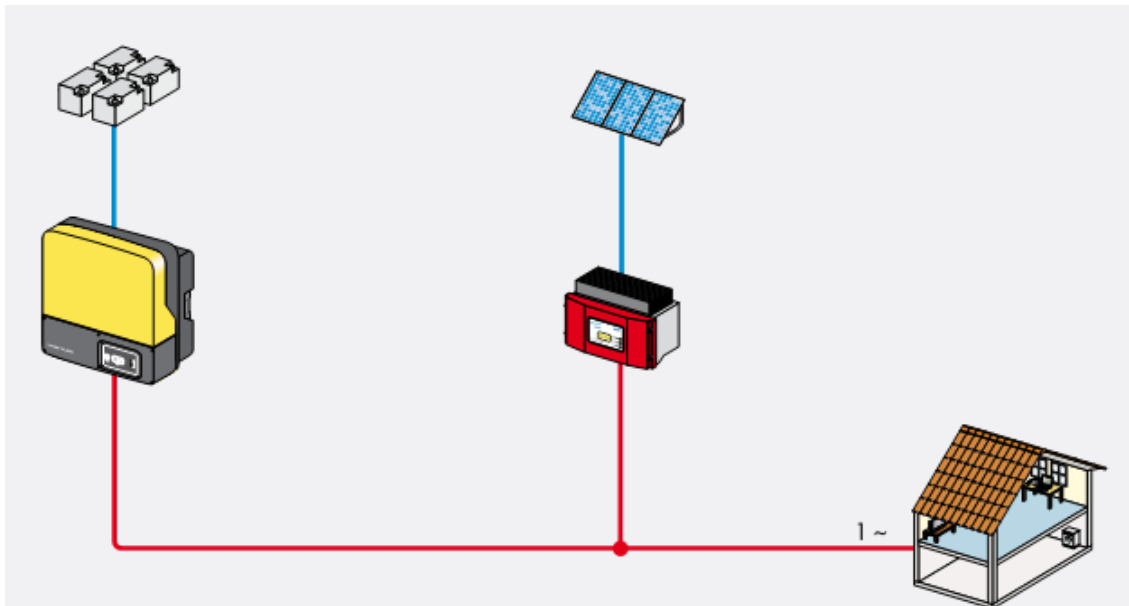
- En instalaciones aisladas y sin vigilancia

Para las instalaciones aisladas y sin vigilancia durante largos períodos de tiempo, se requieren sobre todo sistemas aislados con potencias de entre 2 y 3 kW. Estos sistemas no sólo deben trabajar de forma especialmente fiable, sino también resistir condiciones ambientales extremas. Las oscilaciones de temperatura, la alta humedad del aire y un alto contenido de sal en el aire requieren un cuidado máximo a la hora de elegir todos los componentes.

Las aplicaciones típicas en esta categoría de potencia son, entre otras, estaciones de telecomunicaciones, que sólo requieren un mantenimiento mínimo.

Sunny Island	SI 2224
Sunny Boy	SB 1100
Potencia Solar máxima	1.2 kWp
Potencia del inversor de batería	2.2 kW
Energía disponible al año	800 kWh
Tiempo de autonomía	3 días

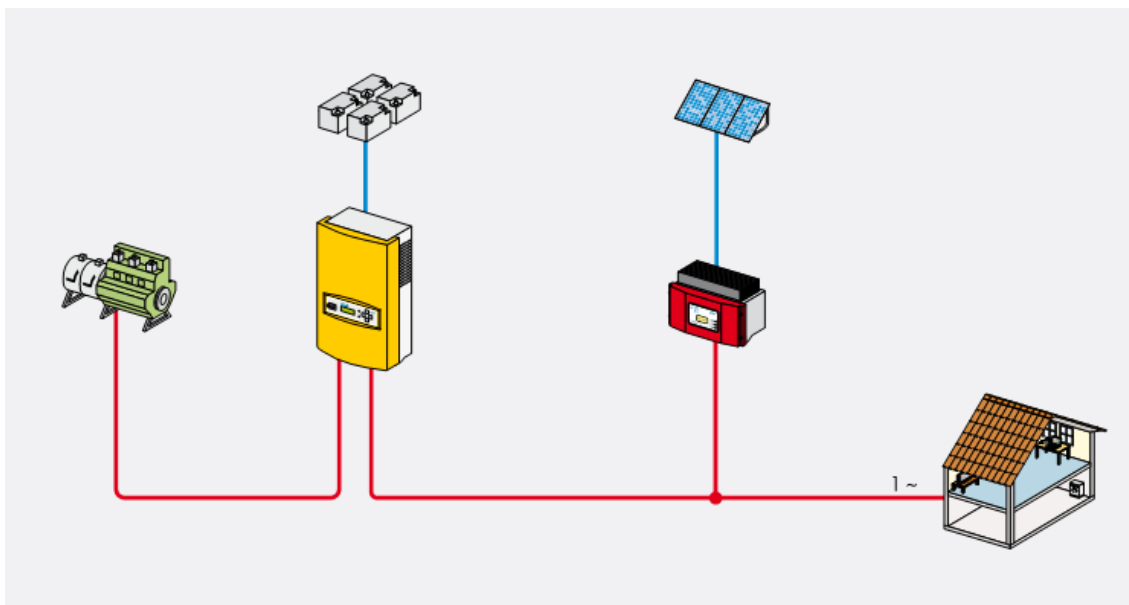
Figura D1. Esquema de instalación aislada



- Vivienda unifamiliar en España

Sunny Island	SI 3324
Sunny Boy	SB 1700
Potencia Solar máxima	1.9 kWp
Potencia del inversor de batería	3.3 kW
Energía disponible al año	2500 kWh
Banco de baterías	14.4 kWh
Tiempo de autonomía	2 días
Tiempo de autonomía	3 días

Figura D2. Esquema de conexión de una vivienda unifamiliar



Anexo E. Sistema de Puesta a Tierra y Apantallamiento

Todas las instalaciones eléctricas requieren una conexión a tierra con el fin de:

- Minimizar los riesgos de electrocución para el personal y los animales.
- Establecer una ruta de baja impedancia para las corrientes de falla a tierra y, por tanto, un satisfactorio funcionamiento de las protecciones.
- Mejorar la protección ante posibles descargas atmosféricas y mantener las tensiones de paso y contacto dentro de límites razonables.
- Evitar grandes diferencias de potencial que son peligrosas tanto para el personal como para los equipos.

Debido que las conexiones a tierra poseen implicaciones para la seguridad existen normas nacionales e internacionales para la instalación de sistemas de puesta tierra.

Los Parques eólicos, a menudo son afectados por descargas atmosféricas; debido a la altura de los aerogeneradores, y su gran extensión. Estos algunas veces se encuentran situados en terrenos montañosos, altas colinas donde es muy difícil obtener valores bajos de impedancia. Por lo tanto la utilización normal del SPT no es muy práctico ya que, se requiere unas consideraciones especiales. La práctica recomendada IEEE (1991), dice que “toda la instalación de parques eólicos deben tener un sistema de conexión a tierra de todos los equipos”. Esto debe incluir, subestaciones, transformadores, torres, generadores, y equipos electrónicos. Esta práctica se sigue generalmente con conductores desnudos que se unen entre si para proporcionar la vinculación de todas las partes del parque eólico a tierra, así como un electrodo horizontal para reducir la impedancia del SPT.

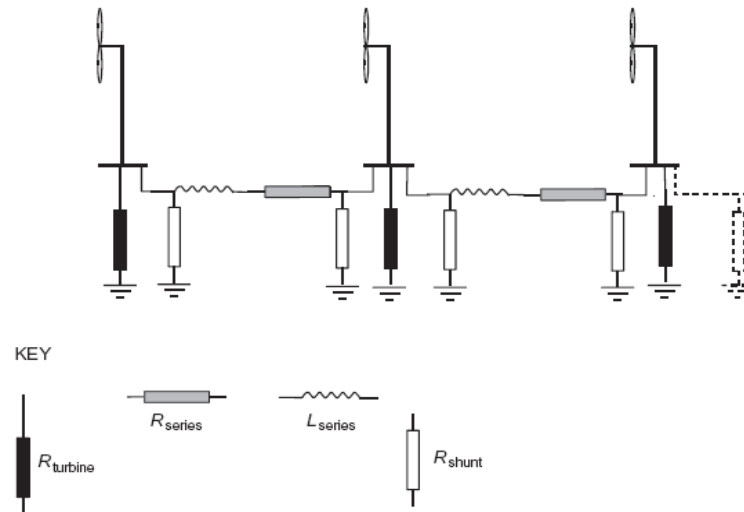
Las estadísticas muestran que la mayoría de los daños que ocurren sobre los aerogeneradores y sus equipos electrónicos son debidos a impactos directos de

rayos y menos a tensiones transferidas producto de fallas cercanas. Normalmente el mismo sistema de puesta a tierra es usado para la protección contra fallas (50/60 Hz) y contra impactos de rayos. Sin embargo, la función de cada una es notablemente diferente debido a las componentes de alta frecuencia que poseen las corrientes de los rayos.

El funcionamiento del SPT de un parque eólico puede ser entendido en la figura E1.

En cada aerogenerador es construido un sistema de puesta a tierra colocando generalmente un anillo alrededor de la torre a una profundidad cercana a 1 metro y colocando electrodos verticales combinados con el anillo en la figura E1 es representado por R_{turbine} . Es muy común interconectar el sistema de puesta a tierra con los cimientos de la base de la torre de la turbina. El propósito de esta puesta a tierra local es proporcionar una unión equipotencial contra los efectos de las descargas atmosféricas, las fallas a una frecuencia de (50/60Hz) y además de constituir, un elemento del sistema completo de puesta a tierra del parque eólico. Los valores de resistencia a lograr dependen de las regulaciones de cada país. Típicamente en los países se utiliza de menos de 10Ω . Esta puesta a tierra local puede representarse esquemáticamente como una resistencia pura.

Figura E1. SPT de un parque eólico



En los parques eólicos se interconectan los sistemas de puestas a tierra individuales que posee cada aerogenerador. Esto trae consigo que la componente inductiva de la impedancia sea mayor que la componente resistiva. El conductor de puesta a tierra que interconecta el SPT de cada turbina tiene un comportamiento más complejo (similar a una línea de transmisión) y puede ser representado como el circuito equivalente π . Así la resistencia a tierra es R_{shunt} mientras que la impedancia serie es la combinación de R_{series} y de L_{series} . R_{series} es simplemente la resistencia del electrodo de tierra mientras que la L_{series} es la autoinductancia del circuito de tierra. Debido a la extensión de la malla de tierra que interconecta todas las turbinas, la impedancia serie que aparece no puede ser ignorada ya que para los componentes de alta frecuencia de la caída de una descarga atmosférica en un aerogenerador, la inductancia serie actúa eficazmente para mitigar la descarga. Incluso con corrientes de falla a 50/60 Hz la impedancia serie, la conduce a impedancias significativamente mayores del SPT. Hasta ahora, se ha ignorado la capacitancia Shunt, aunque esta puede ser importante en altas frecuencias.

Para la conexión del SPT del aerogenerador, el refuerzo metálico de los cimientos de la torre deberá ser integrado e interconectado con el SPT que se desee instalar. Es recomendable el uso de los cimientos de la estructura y del edificio de control como sistema de puesta a tierra debido a la protección que ofrece el concreto a la corrosión de los conductores. Además, se deberán interconectar la puesta a tierra de la base de la torre con la puesta a tierra del edificio de control con el objetivo de obtener un sistema de puesta a tierra equivalente con la mayor superficie posible.

Para el diseño del SPT de los aerogeneradores no es posible utilizar técnicas convencionales de cálculo que tienen en cuenta sistemas pequeños de puesta a tierra y además no tienen en cuenta las componentes reactivas de la impedancia creadas por los largos conductores o contrapesos que interconectan las puestas a tierra locales de cada turbina eólica. El único método efectivo para determinar la impedancia de tierra a frecuencia de potencia (50/60 Hz) de un parque eólico de gran tamaño es el método nombrado, de inyección de corriente. En esta prueba una corriente (típicamente entre 10-20 A) es inyectada dentro del sistema de puesta a tierra del parque eólico y es medida la caída de potencial con respecto a un punto de referencia. Sin embargo, el camino de regreso de la corriente inyectada debe estar bastante alejado del parque eólico (usualmente entre 5-10 Km.), para asegurar que la medición no se vea afectada por el área efectiva de la puesta a tierra del parque eólico. Es por esto que puede ser utilizado como camino para inyectar la corriente, las líneas eléctricas de distribución de energía, estando por supuesto las mismas desenergizadas.

La elevación del potencial en el SPT del parque eólico es medida en relación a una tierra remota que clásicamente puede transferirse a un sitio sobre el circuito de telefonía. Idealmente la ruta del circuito de teléfonos debe ser perpendicular al circuito de potencia, para evitar los efectos de inducción. Puede ser visto que la ejecución práctica de estas pruebas es extremadamente difícil y cara. También se hace bastante difícil el uso de los circuitos telefónicos para brindar la referencia de

tierra remota, debido a que las compañías de telecomunicación incrementan cada día el uso de medios de comunicación inalámbricos. Sin embargo, es muy cuestionable realizar pruebas más simples que pueden dar resultados en redes de puesta a tierra extensas en presencia de significantes inductancias series.

En el análisis de diferentes configuraciones del SPT aplicadas actualmente por empresas que construyen parques eólicos, se demostró que:

La impedancia del SPT no cambia significativamente en función de su profundidad.

Un incremento de la profundidad, trae consigo una disminución de las tensiones de paso.

Las descargas atmosféricas incrementan las tensiones de paso y la impedancia del SPT, en comparación a las fallas convencionales que ocurren a frecuencia de (50/60 Hz).

El aumento del diámetro del anillo del SPT disminuye las tensiones de paso. Por lo que, si el diámetro es suficientemente grande no es necesario adicionar electrodos verticales, lo cual incrementaría el costo del sistema a instalar.

Incrementando la profundidad de ubicación del SPT de 0.5 m a 0.8 m las tensiones de paso disminuirán significativamente.

E.1 PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Una descarga atmosférica es un riesgo potencial importante para los aerogeneradores y de las medidas de protección adecuadas que deben tomarse. Hace algunos años, se pensaba que como las palas de los aerogeneradores están hechas de material no conductor (ejemplo, Plástico reforzado con vidrio o madera-epoxy) entonces no era necesario proporcionar protección explícita para estos tipos de palas, con tal que no incluyeran elementos metálicos para la

operación de dispositivos como el freno de la punta de la pala. Sin embargo, ahora hay una gran cantidad de experiencia en el sitio para demostrar que los rayos caen a las palas de estos materiales y pueden causar daños catastróficos si los sistemas de protección adecuados no se han instalado. Por supuesto, si la fibra del carbón, se utiliza para reforzar las palas, entonces es necesario tomar precauciones adicionales. En respuesta a los daños experimentados en los sitios, se han desarrollado una serie de nuevas normas y recomendaciones para la protección contra descargas atmosféricas de los aerogeneradores.

Las descargas atmosféricas son un complejo fenómeno natural, a menudo consta de una serie de corrientes de descarga. El término “rayo” es usado para describir la secuencia de descargas que utilicen el mismo camino ionizado y puede durar hasta 1s. Los componentes individuales de un rayo se denominan “movimientos”.

Se dividen generalmente en cuatro categorías principales:

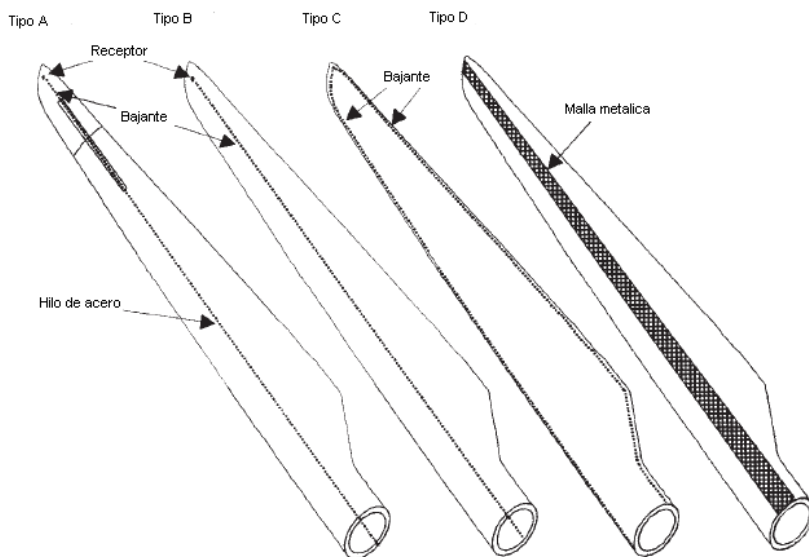
- Líder descendente, polaridad negativa y positiva
- Líder ascendente, polaridad negativa y positiva

Generalmente los relámpagos que comienzan con un líder escalonado de la nube y transferencia de carga negativa a la tierra son generalmente los más comunes (negativo descendente). Típicamente la descarga negativa descendente consiste de un rayo de gran amplitud de corriente y de corta duración (microsegundos) seguidos por corriente continua de muchos amperios. Luego, tras la extinción inicial de la transferencia de corriente entre las nubes y la tierra puede haber un número de descargas subsecuentes. Sin embargo en algunas zonas costeras pueden presentarse mayores descargas positivas descendentes. El inicio ascendente esta normalmente asociado con objetos muy altos (por ejemplo: torres de comunicación) y el relámpago tiene diferentes características. Aunque el pico máximo de corriente de esta forma del relámpago es baja (unos 15kA) la transferencia de carga puede ser alta y, por tanto, tiene un elevado potencial para provocar daños o deterioros. Al evolucionar el tamaño de los

aerogeneradores, hay mayor distancia entre las palas y la tierra, así aumenta la preocupación por el efecto de las descargas negativas ascendentes a las que pueden estar expuestos.

En la figura que se muestra a continuación, muestra las técnicas normalmente usadas para proteger las alabes de las turbinas contra los efectos de los rayos. La principal distinción que presenta es si un limitado número de terminales o receptores son usados para interceptar el rayo (tipos A y B) o si el diseño es hecho para proteger la totalidad del alabe (tipo C y D). La configuración Tipo A muestra como usando uno o dos terminales en la punta del alabe, el conductor de acero para el control de freno conectado a la punta puede ser usado como bajante. En un alabe sin una punta movable (tipo B) entonces un conductor adicional es instalado. La configuración C tiene las bajantes localizadas en las orillas o bordes del alabe. El tipo D muestra el uso de una malla conductora en cada cara del alabe. El principal mecanismo de daño es cuando la corriente del rayo forma un arco en el aire existente dentro del alabe. La onda de presión de choque causada por el arco puede hacer explotar el alabe o romper la estructura constructiva de la misma. Experiencias de campo han demostrado que el uso de receptores o terminales en la punta del alabe trabajan efectivamente, en presencia de alabes con tamaños de hasta 20 m de longitud.

Figura E2. Sistema de apantallamiento de los alabes de un aerogenerador

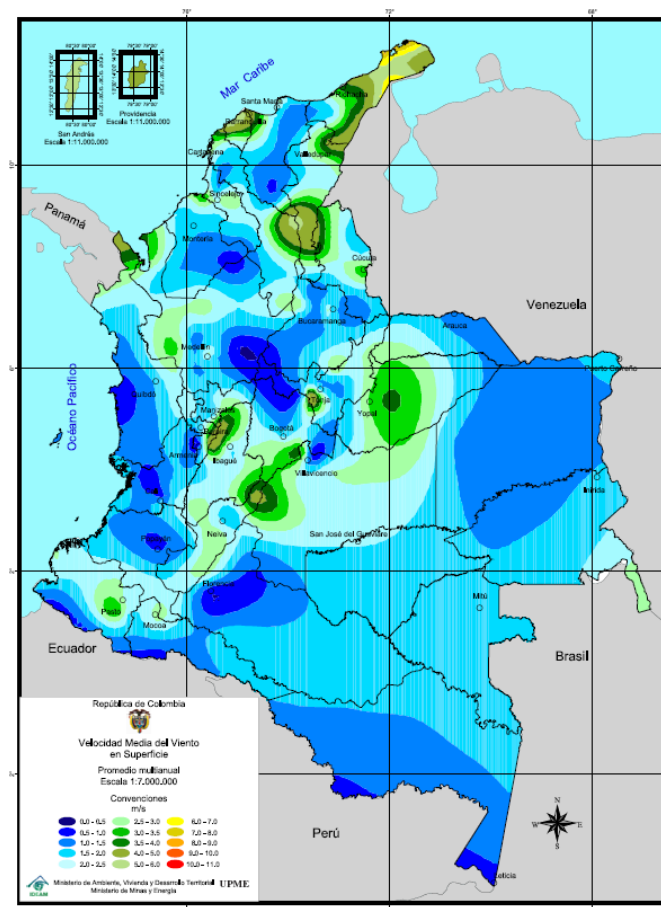


Hay datos limitados disponibles para los grandes aerogeneradores pero esto, puede ser cuestionable si sólo un receptor en la punta ofreciera una buena protección para palas muy largas.

Una vez que la corriente de la descarga ha sido conducida a la raíz de la hélice, el problema continúa en asegurar el paso de la descarga en el exterior de la torre hacía la tierra. Esto no es tan sencillo, ya que el paso de la corriente a través del pitch, eje y orientación de los rodamientos, no puede ocasionar daños en el generador y los equipos de control sensibles en la góndola.

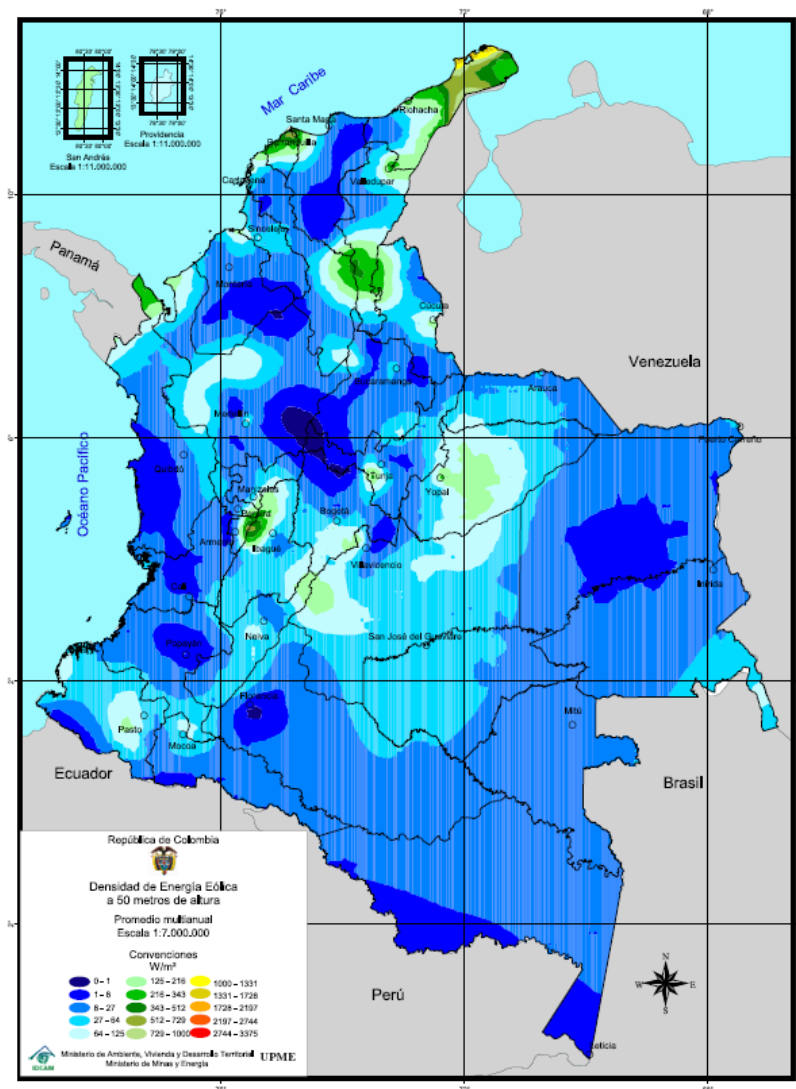
Anexo F. Mapa de velocidades promedio anuales del viento a 10 y 50 metros de la superficie

Mapa de Velocidad media del viento en superficie a 10m de altura.



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2006. p.169.

Mapa de Velocidad media del viento en superficie a 50m de altura.



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2006. p.170.

Anexo G. Políticas de gobierno y referentes normativos

Esta claro que el compromiso industrial y político conjunto, forma parte de la expansión del uso de energías renovables. Logrando aumentar la penetración de la generación de electricidad por medio de fuentes alternas a nivel local, regional nacional y mundial, se logra obtener una disminución en las tarifas de energía, reducir las emisiones de gases contaminantes y que la electricidad pueda llegar a cualquier zona aislada.

Es por esto que, en este anexo se encontraran algunos países que han desarrollado sistemas para el mercado de las energías renovables y algunos referentes normativos que se deben tener en cuenta en el momento de utilizar alguna de las tecnologías eólica, solar y diesel.

En Colombia se aplica la NTC 2050 y las NTC'S, desarrolladas por los comités técnicos No. 24 de ENERGIA SOLAR Y FV, y el comité No. 185 ENERGIA EÓLICA.

En el comité técnico No. 24 se encuentra normalizado el campo de la energía solar en aplicaciones como: calentamiento de agua, procesos industriales, aire acondicionado y generación FV. Este comité fue creado en 1986 con el propósito de brindar productos y servicios de alta calidad y permitir su desarrollo como energía alternativa y ecológica.

Algunas NTC's elaboradas en el ámbito de la energía solar, son las siguientes:

NTC terminología:

NTC 1736, Energía solar. Definiciones y nomenclatura.

NTC 2775, Energía solar FV. Terminología y definiciones.

NTC medición de propiedades:

NTC 2631, Energía solar. Medición de transmitancia y reflectancia fotométricas en materiales sometidos a radiación solar.

NTC componentes de sistemas solares de calentamiento de agua:

NTC 2774, Evaluación de materiales aislantes térmicos empleados en colectores solares.

NTC 3322, Sellos de caucho usados en colectores solares de placa plana.

NTC 3507, Instalación de sistemas domésticos de agua caliente que funcionan con energía solar.

NTC componentes de sistemas solares fotovoltaicos:

NTC 2883, Módulos FV de silicio cristalino para aplicación terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo.

NTC 5287, Celdas y baterías secundarias para sistemas de energía solar fotovoltaica. Requisitos generales y métodos de ensayo.

NTC 5433, Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.

En el comité técnico No. 185 se encuentra normalizado el campo de la energía eólica con sus diferentes aplicaciones. Aquí se encuentran las normas y guías técnicas colombianas en cuanto a esta tecnología.

Algunas GTC's y NTC's, son las siguientes:

GTC 113, Guía para la utilización de energía eólica para bombeo de agua.

GTC 172, Guía para generación de energía eléctrica.

GTC 139, Sistemas de aerogeneradores protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

NTC 5343, Aerogeneradores. Ensayo de curva de potencia.

NTC 5363, Aerogeneradores. Requisitos de seguridad.

NTC 5467, Aerogeneradores. Técnicas de medida de ruido acústico.

La mayoría de estas normas, se elaboraron con referentes internacionales como ISO-IEC.

La parte de seguridad eléctrica esta definida por el RETIE, sin embargo para los demás componentes asociados a la energía FV y eólica el mismo reglamento

indica de forma general que deben seguirse normativas específicas de modo que se garantice la seguridad del usuario final. Esto indicaría que de forma explícita se haría necesario utilizar las NTC's o normas internacionales pertinentes aplicables a los sistemas FV y eólicos, no señalados de forma implícita en el RETIE.

Además de las normas y guías colombianas, también el uso de las energías renovables se está promoviendo por medio de incentivos tributarios a proyectos que implementen mecanismos de desarrollo limpio.

A nivel mundial existen ayudas políticas como el sistema de primas (feed-in tariff): impulsor de la historia de éxito de la energía solar en Europa, el cual ha demostrado durante muchos años su poder y eficacia en el desarrollo de nuevos mercados en cuanto a la producción de energía limpia para Europa.

En todo el mundo, la gente se sorprende de que Alemania, un país que no es uno de los lugares más soleados del mundo, haya desarrollado el mercado de electricidad solar más dinámico y sólido, con una industria FV en expansión. Esto ha sido posible debido a que, en el pasado se probaron diversos tipos de programas en muchos países para acelerar el mercado FV, pero ninguno tuvo tanto éxito en un plazo de tiempo tan corto como el sistema de primas de Alemania. La idea se adaptó para aplicarla en otros estados europeos, ajustando a cada país el sistema, de acuerdo con sus necesidades específicas. La simplicidad del concepto y sus bajos costos administrativos hacen que sea una herramienta muy eficaz para impulsar la contribución de la electricidad solar en las combinaciones energéticas nacionales.

La idea básica del sistema de primas es muy simple. Los productores de electricidad solar:

- Tienen derecho a suministrar electricidad solar a la red pública

- Reciben una prima por kWh generado que refleja las ventajas de la electricidad solar en comparación con la electricidad generada mediante combustibles fósiles o energía nuclear
- Reciben la prima durante un periodo de tiempo fijo.

Además, el programa de primas funciona al margen de la economía del estado, y el costo adicional que tiene que pagar cada consumidor de electricidad para aumentar la cuota de energía renovable en la cartera eléctrica nacional, es muy pequeño.

Legislación en Alemania

La ley de energía renovable alemana (EEG) ha inspirado a muchos países en todo el mundo. Esta ley, no sólo ha sido el motor de la industria FV alemana, también ha demostrado al resto del mundo que el compromiso político puede ayudar a conseguir metas medioambientales y dirigir a la vez el desarrollo industrial. En junio de 2007, el parlamento alemán decidió modificar la EEG. Los coeficientes de regresión anual aumentarán a partir de 2009. Además, ya no habrá bonificaciones por sistemas integrados en la fachada. Si el crecimiento del mercado FV (instalaciones nuevas) en un año es mayor o menor que el corredor de crecimiento definido, la regresión en el año siguiente aumentará o disminuirá respectivamente en un punto porcentual.

Otro caso es el de España, que se convierte en otro de los países que apoya por medio de sus políticas de gobierno la utilización de energías renovables para la producción de electricidad.

Legislación en España

En el ámbito nacional español existe actualmente un sistema de primas (feed-in tariff) para las instalaciones FV conectadas a la red, y un sistema de subvenciones para los sistemas no conectados a la red (un mercado que crece constantemente

a un ritmo de 2 MW al año). Las comunidades autónomas tienen autoridad legal para establecer ayudas adicionales (por ejemplo, para instalaciones en áreas urbanas), pero de forma muy limitada e irrelevante, en cualquier caso. En la actualidad, España no tiene ningún objetivo definido para la energía fotovoltaica. Se fijó un objetivo de 400 MW en 2010 (371 MW conectados a la red), pero se alcanzó en agosto de 2007. Ahora, el nuevo real decreto deberá fijar nuevos objetivos, al menos para 2009 y 2010, hasta la aprobación del Plan de Energía Renovable 2011-2020. Hasta ahora, el mercado FV español se ha orientado a las instalaciones sobre el terreno, que representan el 95% de la capacidad instalada total en 2007. El nuevo real decreto debería fomentar los sistemas FV integrados en edificios, con límites claramente definidos para cada tipo de aplicación (sobre el terreno, de tejado e integradas en edificios).

La mayoría de los países de Europa, algunos de Latinoamérica y EE UU que adoptan procesos de producción más limpia y utilicen energías renovables, establecen marcos legales y políticas en las que se encuentran ciertas normas y recomendaciones para garantizar la seguridad de las personas, animales y equipos instalados. Estas normas son creadas y aprobadas por el IEC

Por ejemplo la norma IEC 62257: "Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification". Son numerosas las normas que pueden afectar a este tipo de sistemas, dadas las diversas tecnologías implicadas:

- baterías: IEC-61427.
- generador FV: en las normas IEC se encuentran varias, entre ellas: 60891, 60904, 61829, 61724.
- generador eólico: serie IEC-61400
- grupo electrógeno: IEC 60034, 62257, ISO 8528.

Anexo H. Tabla de Sistemas Híbridos a nivel mundial

Tabla de algunos sistemas híbridos a nivel mundial (>4 kW)							
Sitio	Localización	Viento	FV	Generador Diesel	Baterías	Inversor	kWh/día
Nannup	Australia	20 kW	0,44 kW		100 Ah	4,5 kW	40 kWh
Isla Tac	Chile	7,5 kW		12 kW	2100 Ah	4,5 kW	
Natural bridges national momument	USA		100 kW	40 kW	600 Ah	50 kW	
Tamala Station	Australia	4,5 kW		6 kVA		2,4 kW	
Xcalak	México	42 kW	11,2 kW	50 kW	1638 Ah	40 kW	120-250 kWh
Maria Magdalena	México	5 kW	4,3 kW	16,7 kVA	132 kWh		45 kWh
Isla de Xiaoguandao	China	25 kW	5 kW	30 kW	1000 Ah	30 kW	
Campinas	Brasil		50 kW	48 kW			350 kWh
Las Vegas	Argentina	20 kW			800 Ah	4,5 kW	
Isla Rote	Indonesia	10 kW	22 kW	20 kW			48 kWh
RAPS Indiana	Perú		60 kW	200 kW	3000 Ah	160 kW	600 kWh
Hilaire	Haití	2,4 kW	2,24 kW	12,5 kVA	1128 Ah		
Atulayan	Sur de Filipinas	20 kW	0,9 kW	750 Kva	2000 Ah	16,5 Kva	36,5 kWh
Sistema Híbrido Móvil	USA		38,4 kW	300 Kw		60 kW	
Chorreras	México		2,4 kW	6,3 kW	2200 Ah	10 kW	8,9 kWh

Anexo I. Artículo Publicable

Anexo J. CD con simulación en pscad del Sistema Híbrido E-D

Anexo K. Anteproyecto