



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

**División de Ciencias e Ingeniería**

**ANÁLISIS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y  
PROPUESTA DE UN SISTEMA HÍBRIDO (SOLAR-  
EÓLICO-CELDA DE COMBUSTIBLE) DEL HOTEL  
ECOTUCÁN**

**TRABAJO MONOGRAFICO**

Para obtener el Grado de

*Ingeniero en Sistemas de Energía*

**PRESENTA**

**JAVIER LEYVA FLORES**

**SUPERVISORES**

M.E.S. ROBERTO ACOSTA OLEA  
M.C. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA  
M.C. VICTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

Chetumal, Quintana Roo, Noviembre 2005

049697



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**División de Ciencias e Ingeniería**

Trabajo monográfico elaborado bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ**

**Supervisor:** M.E.S. Roberto Acosta Olea

**Supervisor:** M.C. Fernando Enrique Flores Murrieta

**Supervisor:** M.C. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Chetumal, Quintana Roo, Noviembre de 2005



## **Dedicatoria:**

*A mis padres, por su apoyo incondicional y ser mi motivo de superación.*

*A mis hermanos.*

## **Agradecimientos:**

*Al M.E.S. Roberto Acosta Olea, quien me brindo su confianza y apoyo para poder realizar este trabajo monográfico.*

*Al Comité examinador de este trabajo, M.C. Fernando Enrique Flores Murrieta y al M.C. Víctor Manuel Sánchez Huerta, por haber aportado parte de su tiempo y conocimientos.*

*A todos y cada uno de los profesores de la División de Ciencias e Ingeniería que formaron parte de mi formación académica.*

*A mis compañeros de clase en los cuales encontré grandes amigos y siempre me demostraron su camaradería y apoyo.*



## Contenido

<b>Nomenclatura .....</b>	<b>1</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>2</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>3</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Antecedentes .....	6
1.2 Justificación .....	7
1.3 Objetivos .....	8
<b>Capítulo 2: Componentes de sistemas híbridos.....</b>	<b>9</b>
2.1 Descripción de sistema híbrido .....	9
2.2 Sistema fotovoltaico .....	13
2.3 Sistema eólico.....	18
2.4 Celdas de combustible.....	24
2.5 Generalidades sobre los sistemas híbridos .....	29
<b>Capítulo 3: Análisis de la instalación eléctrica del hotel.....</b>	<b>30</b>
3.1 Características del sistema fotovoltaico para cargas en CD .....	31
3.2 Características del sistema fotovoltaico para cargas en CA .....	37
<b>Capítulo 4: Propuesta de sistema híbrido .....</b>	<b>42</b>
4.1 Características de los componentes del sistema híbrido .....	42
4.2 Dimensionamiento del sistema híbrido .....	44
<b>Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>49</b>
<b>Recursos bibliográficos.....</b>	<b>51</b>



## Nomenclatura

A	Ampere	M	Número de módulos fotovoltaicos
A-h	Ampere-hora	ml	Mililitro
Au	Días de autonomía del banco de baterías	mm	Milímetro
C	Carbono	mph	Millas por hora
CA	Corriente alterna	MW	Megawatt
C <sub>B</sub>	Capacidad del almacenamiento del banco de baterías	nm	Nanómetro
CD	Corriente directa	$\eta$	Eficiencia
cm	Centímetro	$\eta_B$	Eficiencia del banco de baterías
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	$\eta_C$	Eficiencia del controlador de carga
Ec	Energía consumida en watts-hora	$\eta_i$	Eficiencia del inversor
Fi	Factor de incremento del banco de baterías debido a descarga más lenta	$\eta_T$	Eficiencia debido al efecto de la temperatura
Fs	Factor de sobredimensionamiento	$\eta_W$	Eficiencia del cable conductor
FV	Fotovoltaico	PbSO <sub>4</sub>	Acido de plomo
fu	Factor de uso de baterías	P <sub>M</sub>	Potencia pico del módulo fotovoltaico
g	Gramo	P <sub>max</sub>	Potencia máxima
Hp	Horas pico	psi	Libra por pulgada cuadrada
Hz	Hertz	Pt	Platino
i.e.	Por ejemplo	s	Segundo
I <sub>Pmax</sub>	Corriente de módulo a potencia máxima	STC	Condiciones estándar de prueba
I <sub>sc</sub>	Corriente de módulo a corto circuito	V	Volt
km	Kilómetro	V <sub>nB</sub>	Voltaje nominal del banco de baterías
kg	Kilogramo	V <sub>oc</sub>	Voltaje a circuito abierto de módulo fotovoltaico
KOH	Hidróxido de Potasio	VP	Valor presente
kW	Kilowatt	V <sub>pmax</sub>	Voltaje a potencia máxima
kWh	Kilowatt-hora	W	Watt
m	Metro	W-h	Watt-hora



## Lista de figuras

<b>Figura 2.1</b> Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido, fotovoltaico-eólico-diesel .....	9
<b>Figura 2.2</b> Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido en serie .....	10
<b>Figura 2.3</b> Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido con interruptor de transferencia ..	11
<b>Figura 2.4</b> Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido en paralelo .....	12
<b>Figura 2.5</b> Esquema de componentes de un módulo fotovoltaico .....	13
<b>Figura 2.6</b> Diagrama de los componentes de un sistema fotovoltaico básico .....	14
<b>Figura 2.7</b> Fotografía de diferentes tipos de módulos solares; monocristalino, policristalino y amorfo .....	15
<b>Figura 2.8</b> Fotografía de tipos de controladores de carga .....	16
<b>Figura 2.9</b> Fotografía de un banco de baterías.....	16
<b>Figura 2.10</b> Fotografía de inversor Xantrex DR Series.....	17
<b>Figura 2.11</b> Fotografía cargas comunes en sistemas fotovoltaicos .....	17
<b>Figura 2.12</b> Fotografía de un aerogenerador para aplicaciones aisladas .....	19
<b>Figura 2.13</b> Fotografía de un aerogenerador para centrales eoloelectricas .....	19
<b>Figura 2.14</b> Esquema de los subsistemas de un aerogenerador.....	20
<b>Figura 2.15</b> Fotografía de una torre de celosía.....	22
<b>Figura 2.16</b> Fotografía de una torre tubular.....	22
<b>Figura 2.17</b> Esquema del funcionamiento básico de una celda de combustible.....	24
<b>Figura 2.18</b> Esquema de los componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM .....	26
<b>Figura 2.19</b> Esquema del recorrido del hidrógeno en una celda PEM, a través de sus diferentes componentes.....	27
<b>Figura 3.1</b> Fotografía de la entrada al hotel "Villas Ecotucan" .....	30
<b>Figura 3.2</b> Mapa de ubicación geográfica del hotel "Villas Ecotucan" .....	30
<b>Figura 3.3</b> Fotografía del sistema fotovoltaico para cargas en CD .....	30
<b>Figura 3.4</b> Fotografía del sistema fotovoltaico para cargas en CA .....	30
<b>Figura 3.5</b> Fotografía de la placa de los módulos.....	31
<b>Figura 3.6</b> Fotografía de los módulos de silicio amorfo .....	31
<b>Figuras 3.7</b> Fotografía del Banco de baterías del sistema fotovoltaico .....	32
<b>Figuras 3.8</b> Fotografía del Banco de baterías del sistema fotovoltaico .....	32
<b>Figura 3.9</b> Fotografía del controlador de carga del sistema fotovoltaico .....	32
<b>Figura 3.10</b> Fotografía del controlador de carga del sistema fotovoltaico .....	32
<b>Figura 3.11</b> Esquema de la instalación eléctrica del sistema fotovoltaico para cargas en CD .....	33
<b>Figura 3.12</b> Fotografía del centro de carga del sistema fotovoltaico .....	33
<b>Figura 3.13</b> Fotografía del centro de carga del sistema fotovoltaico .....	33
<b>Figura 3.14</b> Fotografía del registro eléctrico .....	34
<b>Figura 3.15</b> Fotografía de una lámpara de 13 W .....	34
<b>Figura 3.16</b> Fotografía de un ventilador de 17 W .....	34
<b>Figura 3.17</b> Fotografía de las cabañas en las cuales se encuentran las cargas del sistema.....	34
<b>Figura 3.18</b> Fotografía de las cabañas en las cuales se encuentran las cargas del sistema.....	34
<b>Figura 3.19</b> Mapa de recurso solar en México .....	36
<b>Figura 3.20</b> Fotografía del arreglo fotovoltaico .....	37
<b>Figura 3.21</b> Fotografía del efecto de sombreado sobre el arreglo FV .....	37
<b>Figura 3.22</b> Fotografía del banco de baterías.....	38
<b>Figura 3.23</b> Fotografía de un controlador de carga marca Morningstar.....	38
<b>Figura 3.24</b> Fotografía de controlador de carga del arreglo FV .....	38
<b>Figura 3.25</b> Fotografía de un inversor Portawatt .....	39



<b>Figura 3.26</b> Fotografía del inversor del arreglo FV .....	39
<b>Figura 3.27</b> Fotografía de los centros de carga .....	39
<b>Figura 3.28</b> Fotografía de una lámpara de 30W .....	39
<b>Figura 3.29</b> Fotografía de una lámpara de 24W .....	39
<b>Figura 3.30</b> Esquema de la instalación eléctrica del sistema fotovoltaico para cargas en CA.....	40
<b>Figura 4.1</b> Fotografía de un módulo fotovoltaico BP .....	42
<b>Figura 4.2</b> Fotografía de un generador eólico AIR-X.....	42
<b>Figura 4.3</b> Fotografía de las celdas de combustible I-1000 .....	43
<b>Figura 4.4</b> Fotografía de un inversor Xantrex DR1512 .....	43
<b>Figura 4.5</b> Fotografía de un controlador Xantrex C-40 .....	43
<b>Figura 4.6</b> Gráfica de energía producida por el generador eólico contra velocidad instantánea del viento. 44	
<b>Figura 4.7</b> Mapa de recurso eólico en la Península de Yucatán.....	45
<b>Figura 4.8</b> Fotografía de una batería Deka Unigy I 12AVR100 .....	48

### Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Aplicaciones de celdas de combustible de acuerdo al tipo de celda.....	25
<b>Tabla 3.1</b> Datos de placa de los módulos .....	31
<b>Tabla 3.2</b> Cuadro de cargas y consumo del sistema fotovoltaico para cargas en CD .....	35
<b>Tabla 3.3</b> Datos de placa de los módulos .....	37
<b>Tabla 3.4</b> Cuadro de cargas y consumo del sistema fotovoltaico para cargas en CA .....	40
<b>Tabla 4.1</b> Datos de placa del módulo BP 485.....	42
<b>Tabla 4.2</b> Datos de fabricante del AIR-X.....	42
<b>Tabla 4.3</b> Datos de placa del I-1000 .....	43
<b>Tabla 4.4</b> Cuadro de cargas para la propuesta y consumo .....	44
<b>Tabla 4.5</b> Estimación de energía anual producida por un aerogenerador AIR-X en el sitio .....	47
<b>Tabla 4.6</b> Datos de placa de la batería Unigy .....	48



## Resumen

En este trabajo monográfico se desarrolla el tema de un sistema híbrido: fotovoltaico-eólico-celdas de combustible como propuesta de generación de energía eléctrica para un establecimiento hotelero. El trabajo está estructurado de la siguiente manera: El capítulo 1 y 2 se centran en una descripción general de lo que son los sistemas híbridos a base de fuentes de energía renovables. Esta descripción general se basa en documentación existente de diferentes autores e instituciones que han desarrollado o planteado este tipo de sistemas, de los cuales se documentan sus experiencias y criterios para desarrollar estos proyectos.

En el capítulo 3 se presenta el análisis de los dos sistemas fotovoltaicos con los que cuenta el hotel "Villas Ecotucán", Este análisis consiste básicamente de las características, marcas y modelos de los diferentes componentes del sistema, así como también se presenta un análisis crítico a la instalación.

En el capítulo 4 se plantea una propuesta del dimensionamiento de un sistema híbrido: fotovoltaico-eólico-celdas de combustible para el hotel, cabe señalar que esta propuesta tiene como objetivo proporcionar información de la factibilidad de implementar un sistema con esas características, así como de los conocimientos y procesos que se pueden necesitar para poder implementarla.

Por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo monográfico en las cuales se expresan los detalles observados y analizados en el hotel que reflejan el cumplimiento de los objetivos planteados en el trabajo monográfico.



## Capítulo 1: Introducción

El acelerado desarrollo tecnológico que han tenido los equipos y sistemas que aprovechan fuentes de energía renovable y la constante preocupación en la disminución de reservas de energéticos fósiles, son factores claves para que el uso de estos sistemas de generación sea cada día más viable.

Para poder aprovechar plenamente los beneficios que ofrece el uso de las energías renovables se requiere de un esfuerzo conjunto entre gobierno y sociedad. Para ello es necesario que la población esté informada de las características, diversas modalidades, alternativas de desarrollo y beneficios asociados a las energías renovables, y que además participe activamente en su promoción y en la consolidación de una cultura de uso racional de la energía y adopción de las formas renovables de ella<sup>1</sup>.

Actualmente en nuestro país, alrededor de 5 millones y medio de personas carecen de servicio eléctrico. La mayoría por lo general vive en comunidades dispersas, en terrenos de difícil acceso, sin caminos y ningún otro tipo de infraestructura, lo que dificulta la extensión de las líneas eléctricas. Por tal motivo, dichas comunidades difícilmente se verán beneficiadas en el mediano y largo plazo con el servicio eléctrico convencional. Una alternativa para solucionar este problema, es la utilización de la tecnología de sistemas híbridos, que pueden combinar varias fuentes de energía no convencionales para la generación de electricidad. Sin embargo, debido a que esta tecnología se encuentra todavía en etapa de desarrollo, presenta algunas deficiencias relacionadas principalmente a la disponibilidad de la energía, lo cual repercute en la confiabilidad de los sistemas y en el costo de la energía producida<sup>2</sup>.

Los sistemas autónomos son instalaciones en las cuales un solo sistema, por ejemplo un arreglo fotovoltaico (FV) o un pequeño aerogenerador, proporciona toda la electricidad requerida. Además del sistema de generación de energía cuentan con un banco de baterías para almacenar la electricidad, un subsistema de acondicionamiento de la energía y control de cargas y por último una pequeña red de distribución eléctrica que alimenta a todas las cargas, según los diseños. Debido a los altos costos de los elementos que lo constituyen, un sistema autónomo es todavía poco competitivo para proporcionar electricidad con calidad similar a la de la red convencional. En consecuencia, usualmente se limita el período de uso de la electricidad, o bien el número y tipo de aparatos que se pueden conectar.

Los sistemas híbridos están concebidos para superar las limitaciones del sistema autónomo. Según los sistemas de generación utilizado como complemento, los sistemas híbridos pueden ser de múltiples configuraciones, entre las más comunes se encuentran: fotovoltaico-generador microhidráulico, fotovoltaico-generador eólico; con o sin un motogenerador de respaldo. Este último puede a su vez ser a base de diesel, gasolina o gas. El gas puede ser además butano o LP, biogás, u otro tipo de gas disponible en la localidad. La ventaja de los sistemas híbridos sobre los autónomos es que pueden proporcionar mejor servicio eléctrico a costos menores. Su desventaja es que son más complicados de integrar adecuadamente y su operación depende de sofisticados sistemas de control. La mayoría de los sistemas híbridos instalados en el mundo pueden considerarse como en etapa de desarrollo y están siendo estudiados para mejorar los diseños. La competitividad económica de estos sistemas depende de varios factores, entre ellos el grado de concentración de la carga, la disponibilidad y costo de los energéticos complementarios, y la distancia a la red. Se estima que sistemas de este tipo instalados a más de 15 kilómetros de la red eléctrica pueden ser económicamente competitivos. Sin embargo, es necesario efectuar estudios caso por caso para determinar la economía de los sistemas ya que estos deben ser diseñados para cada caso en particular.

<sup>1</sup> ANES; Energías Renovables en México

<sup>2</sup> IIE; Sistemas Híbridos



## 1.1 Antecedentes

Cuando en 1973 se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo en el mundo, que se manifestaron en los años posteriores en un encarecimiento notable de esta fuente de energía no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Resultado de esto, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este energético, tuvieron que modificar costumbres y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables. Entre las opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético, se reconsideró el mejor aprovechamiento de la energía solar y sus diversas manifestaciones secundarias tales como la energía eólica, hidráulica y las diversas formas de biomasa; es decir, las llamadas energías renovables<sup>1</sup>.

Particularmente durante los últimos 20 años, se ha desarrollado en México una importante labor en relación a las energías renovables, sin embargo, los esfuerzos han sido aislados y muchos trabajos valiosos han quedado olvidados por falta de canalización y promoción adecuada<sup>1</sup>.

*En 1989 el Gobierno Federal Mexicano estableció el Programa Nacional de Solidaridad (PRONASOL), un programa para el desarrollo de infraestructura en comunidades carentes de ella. Dentro de este programa, se llevan a cabo caminos, escuelas, agua potable, electrificación, y otros elementos de infraestructura a las comunidades más desposeídas. Desde los inicios de PRONASOL, se reconoció la conveniencia de utilizar fuentes renovables de energía para dotar de electricidad a las localidades más apartadas que carecían de este servicio, estableciéndose así el programa de electrificación rural con fuentes alternas de energía.*

*Como resultados de ese programa se han instalado a la fecha más de 24,000 sistemas fotovoltaicos de alumbrado para casas individuales en diferentes regiones de México; también se han instalado unos 10,000 teléfonos rurales, siete sistemas híbridos de tamaño comunitario (3 FV-eólico-diesel que proporcionan hasta 250 kWh al día y 4 FV-eólico con 10 kW eólicos y 750 a 1600 W de módulos FV cada uno), y 5 pequeñas centrales hidroeléctricas de 25 a 35 kW. Con esto, el programa mexicano de electrificación rural con fuentes renovables de energía se convierte en uno de los programas más grandes de su género en el mundo actualmente<sup>2</sup>.*

En el aspecto de uso de energías renovables en lugares remotos, México es uno de los países líderes, ya que se han instalado a la fecha unos 36,000 pequeños sistemas fotovoltaicos aislados formados por 50 a 100 W de módulos fotovoltaicos, una batería tipo automotriz, controlador electrónico de carga y lámparas eficientes; estos sistemas se instalan en comunidades remotas, y proporcionan iluminación y en algunos casos entretenimiento (televisor, radio, etc.), a igual número de casas. Se han instalado también una docena de sistemas "centralizados", pero aislados de la red eléctrica nacional, sistemas que van de 10 a 200 kW en plantas híbridas fotovoltaico-eólicas que alimentan un banco de baterías, con o sin respaldo de diesel, o pequeñas centrales hidroeléctricas, que suministran el servicio eléctrico a comunidades rurales a través de una red local de distribución. Se han energizado también más de 8,000 teléfonos rurales con sistemas fotovoltaicos<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> CONAE; Energías renovables

<sup>2</sup> IIE; Electrificación rural con sistemas fotovoltaicos

<sup>3</sup> IIE; Generación distribuida



Los recientes cambios a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, abren posibilidades para el autoabastecimiento y la producción independiente de energía eléctrica, interconectando los sistemas a la red eléctrica. Esto presenta interesantes posibilidades para la instalación de plantas fotovoltaicas en el rango de kilowatts a megawatts, y plantea posibles problemas técnicos, económicos, y de seguridad para el personal y los equipos en ambos lados de la interconexión. Con objeto de avanzar en la comprensión de estos problemas y avanzar soluciones, se construyó en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) una instalación fotovoltaica de 2.5 kilowatts que abastece de energía eléctrica a uno de los circuitos de uno de sus edificios. La planta ha estado operando los últimos 16 meses, período que se ha venido monitoreando y analizando su contribución al abastecimiento de electricidad<sup>1</sup>.

## 1.2 Justificación

Debido a la importancia de tener sistemas de generación con energías renovables y que el caso a estudiar se encuentra dentro del ámbito de formación de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía, se puede considerar que el tema es aceptable para el desarrollo de un trabajo de investigación en el cual se demuestre la aplicación de los conocimientos adquiridos durante la etapa de formación académica.

Cabe mencionar que se cuenta con poca información relacionada con los sistemas híbridos de este tipo (fotovoltaico-eólico-celdas de combustible), por lo tanto, este trabajo pretende ser útil como material bibliográfico, así como también de adquirir experiencia en el diseño, manejo e implementación de estos sistemas; además de tener una propuesta vanguardista en la región (sistema híbrido fotovoltaico-eólico-celdas de combustible) y con el agregado de que estará referido en el ámbito eco-turístico con lo que se pretende sea un aliciente más para la promoción de este tipo de tecnologías en la región. Otra característica importante es que el proyecto está relacionado con un establecimiento real.

Los beneficios obtenidos al considerar la tecnología de celdas de combustible en las estrategias energéticas de un país como el nuestro, pueden ser muy numerosos y van desde el hecho que esta tecnología ayude en la transición hacia economías independientes del petróleo, otorgando elementos para un mejor plan estratégico en materia de energía, hasta los enormes beneficios de salud relacionados con las reducciones en emisiones de contaminantes.<sup>2</sup>

Por otra parte, el impulso al uso de sistemas de generación a partir de energías de fuentes renovables (solar, biomasa, eólica, etc.) puede verse favorecido y estimulado por la tecnología de celdas de combustible, ya que la flexibilidad del tipo de combustible de éstas, le permite integrarse en un sistema que considere combustibles directos de fuentes renovables (biomasa) y/o combustibles fácilmente generados como el hidrógeno a partir de tecnologías como la solar y la eólica. Ello significa la posibilidad de una transición en dirección hacia tecnologías limpias y al uso de fuentes renovables de energía.<sup>2</sup>

*Las celdas de combustible son una gran alternativa en la planeación energética a corto, mediano y aún largo plazo de nuestro país, debido a sus características favorables que incluyen la posibilidad de emplear compuestos derivados del petróleo (gas natural) de manera más eficiente alargando así la duración de estos energéticos y significando una transición realista hacia tecnologías que sustituyan las basadas en hidrocarburos. Esto significa el aprovechamiento de la infraestructura actual y creciente en nuestro país, para conformar un mercado energético que utilice hidrocarburos que sean mejor aprovechados en tecnologías eficientes y poco contaminantes como las celdas, tanto en generación de electricidad como en el sector transporte donde incluso las celdas pueden hacer uso de combustibles como*

<sup>1</sup> IIE; Aplicaciones de las Fuentes No Convencionales de Energía en México

<sup>2</sup> IIE; Celdas de combustibles



la gasolina, diesel, alcohol (etanol o metanol) y gas natural, un energético cada vez más popular en nuestro país y cuyo sistema de distribución ya ha sido liberado en algunas zonas urbanas como la ciudad de México a la inversión privada.

Todas las ventajas económicas y de estrategia energética que ofrecen las celdas de combustible tienen como principal bono adicional la reducción de contaminantes, lo cual se podrá conseguir de manera parcial empleando hoy combustibles de origen fósil y de manera total al usar hidrógeno cuya tecnología de producción está muy cercana, siendo la vía electroquímica (parecida a las de las celdas de combustible) la de mayor eficiencia, i.e. 65-85%.<sup>1</sup>

### 1.3 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo de investigación, son:

- \* Realizar un análisis energético a las instalaciones fotovoltaicas existentes en el hotel Villas Ecotucan; el cual consistirá básicamente en visitas de campo con el fin de recabar información necesaria para evaluar si fue bien dimensionado.
- \* Presentar una propuesta de un sistema híbrido (fotovoltaico-eólico-celdas de combustible), para satisfacer las necesidades energéticas de la instalación eléctrica del hotel Villas Ecotucan.
- \* Generar un documento que sirva apoyo bibliográfico para los alumnos de Ingeniería en Sistemas de Energía en el contexto de sistemas híbridos de generación de energía.

---

<sup>1</sup> IIE; Celdas de combustible

## Capítulo 2: Componentes de sistemas híbridos

En este capítulo se presenta una breve explicación de lo que es un sistema híbrido, los componentes que lo pueden conformar y algunas clasificaciones de ellos; asimismo se da una breve explicación de las características y funcionamiento de los sub-sistemas (fotovoltaico, eólico y celdas de combustibles) que conforman el sistema híbrido propuesto para el hotel "Villas Ecotucán".

### 2.1 Descripción de sistema híbrido

Un sistema híbrido básicamente se refiere a la combinación de dos o más fuentes de generación de energía para suministrar el requerimiento necesario en un caso específico, la mayoría de las ocasiones el motivo por el cual se determina utilizar un sistema de generación híbrido se debe en gran parte a la irregularidad del recurso natural (solar, eólico, hidráulico, etc.), ya que no siempre se puede contar con certeza con este tipo de fuentes energéticas. En la actualidad existen muchas configuraciones de sistemas híbridos, entre las cuales se pueden mencionar los más comunes: fotovoltaico-eólico, fotovoltaico-diesel, fotovoltaico-eólico-diesel, etc. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de un sistema híbrido típico.

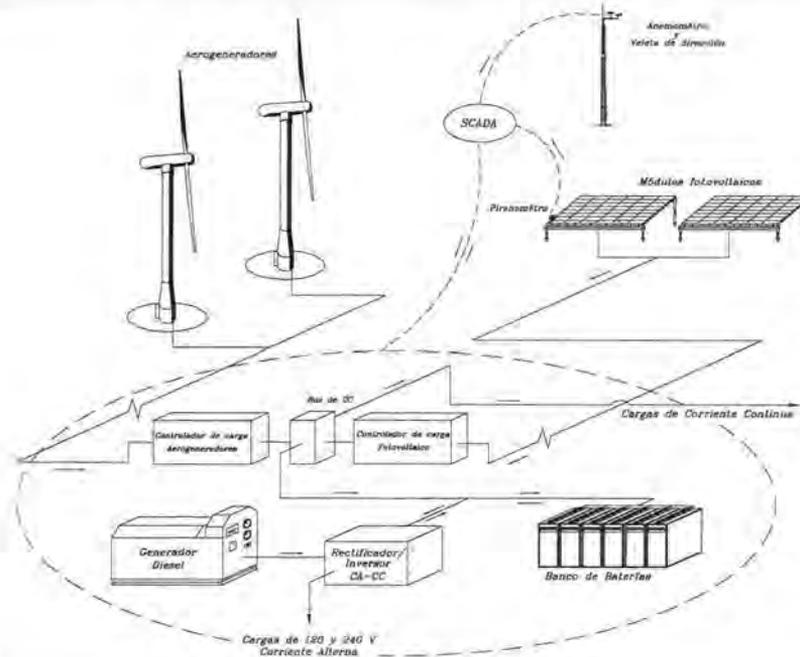


Figura 2.1 Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido, fotovoltaico-eólico-diesel.

En realidad pueden existir muchas configuraciones de sistemas híbridos, y para los fines de estudio de este trabajo de investigación sólo es de interés los sistemas fotovoltaico-eólico-celdas de combustible, es por ello que en este trabajo sólo se describirá los tipos de sistemas que lo conformarán.

Un sistema híbrido genera electricidad en corriente alterna combinando módulos fotovoltaicos o aerogeneradores con un inversor, el cual opera alternadamente o en paralelo con el motogenerador. Estos pueden clasificarse de acuerdo a su configuración como:

- \* Sistemas híbridos en serie
- \* Sistemas híbridos con interruptor de transferencia
- \* Sistemas híbridos paralelos



### 2.1.1 Sistema híbrido en serie

Este tipo de sistema se caracteriza por que toda la energía pasa a través del banco de baterías y la corriente alterna que se alimenta a la carga es convertida en un inversor o mediante un motogenerador que genera en CA. Este sistema puede operarse en modo manual o automático, con la adición apropiada de un sensor de voltaje del banco de baterías para el arranque y paro del generador (ver figura 2.2).

Entre las principales ventajas se tienen:

- \* No requiere ningún interruptor de transferencia entre las diferentes fuentes de energía, lo cual simplifica la interfase de salida.
- \* La potencia suministrada a la carga no se interrumpe con el arranque del generador.
- \* Los inversores pueden ser de señal cuasisenoidal o de onda cuadrada, dependiendo de la aplicación.
- \* El generador puede dimensionarse de manera óptima para cargar el banco de baterías hasta que éste alcance un estado de carga del 75 al 85%.

Entre las principales desventajas se tienen:

- \* El inversor no puede operar en paralelo con el generador, por lo que el inversor debe dimensionarse para suministrar los picos de demanda del sistema.
- \* El banco de baterías es cargado y descargado (ciclado) frecuentemente, lo cual acorta su vida útil.
- \* El perfil de ciclado requiere un banco de baterías grande para reducir la profundidad de descarga.
- \* La eficiencia total es reducida, ya que todo el flujo de energía fluye a través del banco de baterías y del inversor.
- \* Una falla en el inversor producirá una pérdida completa de potencia de la carga.

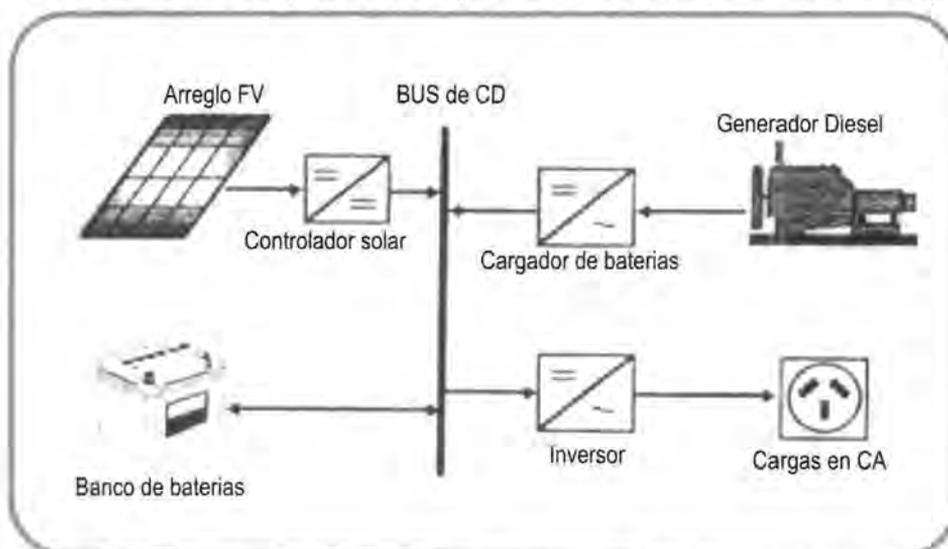


Figura 2.2 Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido en serie.

### 2.1.2 Sistema híbrido con interruptor de transferencia

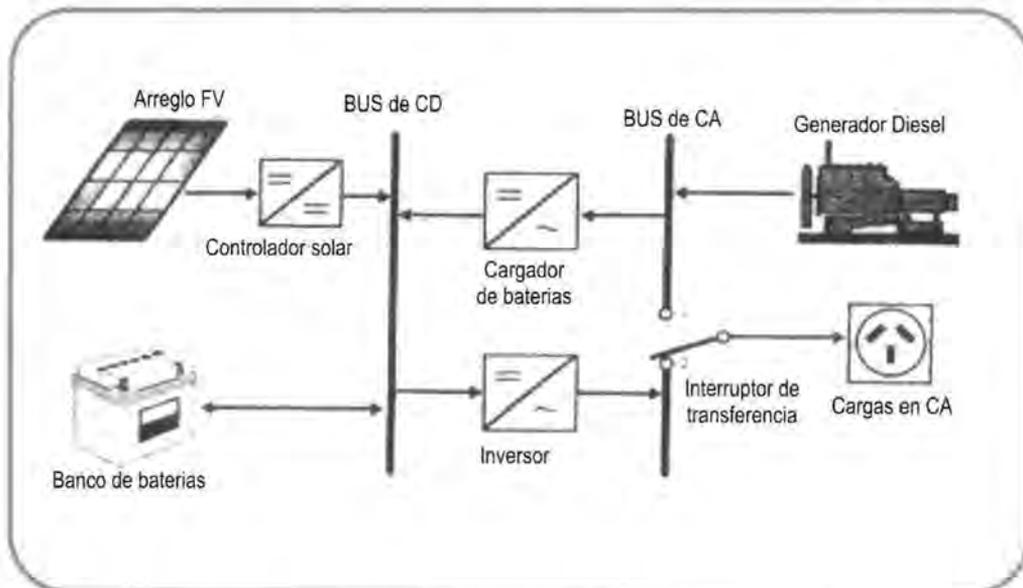
A pesar de sus limitaciones, la configuración con interruptor de transferencia permanece como una de las configuraciones más comunes hasta hoy. Este sistema permite la operación con el alternador o el inversor como una fuente de corriente alterna. Una operación en paralelo de las principales fuentes de generación no es posible todavía. El banco de baterías puede cargarse por medio de un generador y la fuente de energía no renovable. La carga puede ser abastecida directamente por el generador, lo que da como resultado una reducción en el ciclado del banco de baterías (ver figura 2.3). Puede operarse en modo manual, sin embargo, al aumentar la complejidad del sistema es indispensable contar con un controlador automático, pudiéndose incrementar adicionando un sensor apropiado de voltaje de la batería y un control para el arranque o paro del generador.<sup>1</sup>

Entre las principales ventajas se tienen:

- \* El inversor puede ser senoidal, cuasisenoidal o de onda cuadrada, dependiendo de la aplicación.
- \* Ambas fuentes de energía pueden alimentar la carga directamente.

Entre las principales desventajas se tienen:

- \* La alimentación a la carga se interrumpe momentáneamente cuando se hace la transferencia de las fuentes de corriente alterna.
- \* El alternador y el inversor deben diseñarse para abastecer la demanda pico del sistema.



**Figura 2.3** Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido con interruptor de transferencia.

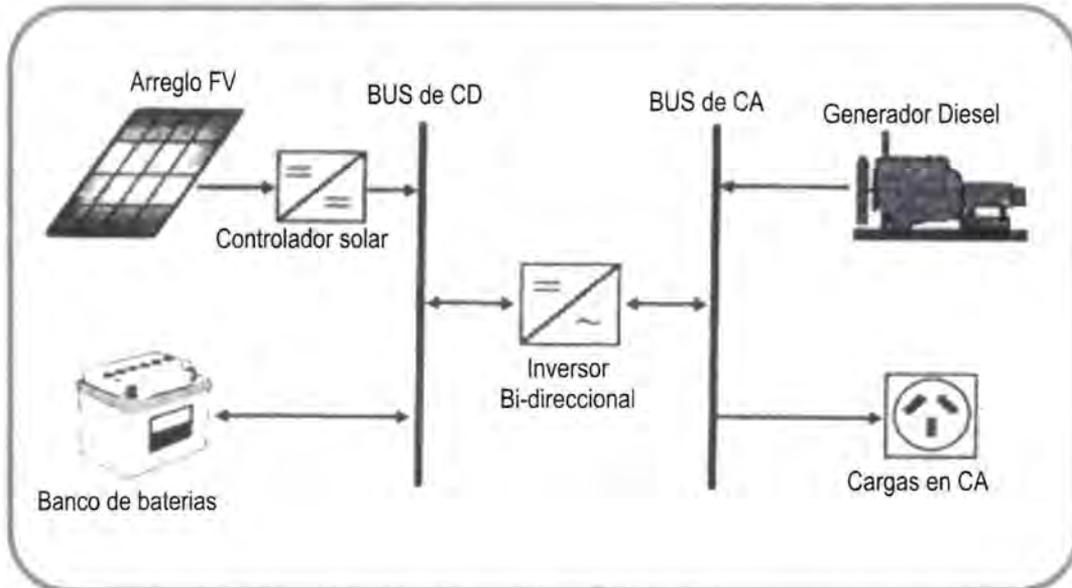
<sup>1</sup> Curso-Taller internacional.- Sistemas Híbridos solar eólico para la generación de electricidad; IEE, CONACYT, RIER, CYTED, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

### 2.1.3 Sistema híbrido en paralelo

La configuración en paralelo permite que todas las fuentes abastezcan la carga de manera separada para satisfacer demandas bajas y medias, así como para abastecer los picos de carga con la combinación de recursos por medio de la sincronización del inversor con el generador (ver figura 2.4). El inversor bidireccional puede cargar el banco de baterías (rectificador) cuando existe un exceso de energía disponible del generador, y también puede actuar como un convertidor CD/CA (inversor) bajo condiciones de operación normales. El inversor bidireccional puede proporcionar las cargas picos de la demanda como una estrategia de control cuando el generador está sobrecargado.

Entre sus principales ventajas se tienen:

- \* La carga del sistema puede cubrirse de manera óptima.
- \* La eficacia del generador puede aumentarse al máximo.
- \* El mantenimiento del generador puede minimizarse.
- \* Una reducción en las capacidades nominales del generador, del banco de baterías, del inversor, y de los recursos renovables es posible, cubriendo también las demandas pico.



**Figura 2.4** Esquema de una configuración típica de un sistema híbrido en paralelo.



## 2.2 Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos que permiten obtener electricidad a un voltaje específico a partir de la energía solar. Las celdas fotovoltaicas convierten directamente parte de la energía de la luz solar en electricidad en corriente continua. Las celdas fotovoltaicas se fabrican principalmente a base de silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, el mismo material semiconductor usado en las computadoras. Cuando el silicio se contamina o dopa con otros materiales de ciertas características, obtiene propiedades eléctricas únicas en presencia de la luz solar

Las celdas fotovoltaicas no tienen partes móviles, son virtualmente libres de mantenimiento y tienen una vida útil de entre 20 y 30 años. La energía producida por una celda fotovoltaica (aproximadamente 1 watt por cada 10 cm<sup>2</sup>) no es suficiente para todas las aplicaciones en donde se pueda usar, por esa razón, las celdas son interconectadas para aumentar la potencia generada. Para protegerlas del medio ambiente, las celdas interconectadas se encuentran fijas por arriba a un vidrio templado y plástico transparente; y por la parte inferior, a un adhesivo plástico. La estructura es enmarcada en un marco metálico que le da sostén y rigidez. A este empaquetamiento se le llama módulo fotovoltaico (ver figura 2.5). En el se encuentran la terminal positiva y negativa que facilitan las conexiones eléctricas.



**Figura 2.5** Esquema de componentes de un módulo fotovoltaico.

La conversión directa de la parte visible del espectro solar es, quizá, la vía más factible de todas las que existen para el aprovechamiento de la energía solar. Desafortunadamente esta tecnología no se ha desarrollado por completo en México. Si bien las celdas fotovoltaicas son relativamente simples, su fabricación requiere de tecnología sofisticada que solamente está disponible en algunos países como Estados Unidos, Alemania, Japón, España entre otros.

Las celdas solares fueron comercializadas inicialmente en 1955. Las investigaciones iniciales en este campo se enfocaron al desarrollo de productos para aplicaciones espaciales, siendo su primera utilización exitosa en los satélites artificiales; sus principales características (simplicidad, bajo peso, eficiencia, confiabilidad y ausencia de partes móviles) las hicieron ideales para el suministro de energía en el espacio exterior. A la fecha las celdas que han alcanzado mayor grado de desarrollo son las de silicio cristalino, tecnología que predomina en el mercado mundial debido a su madurez, confiabilidad en su aplicación y sobre todo, a su vida útil que va de los 20 a los 30 años. Por otra parte las celdas de película delgada, entre ellas el silicio amorfo, han alcanzado cierto grado de popularidad debido a su bajo costo, sin embargo su baja durabilidad, debido a la degradación, las sitúa por debajo de las celdas cristalinas.



Desde principios de la década de los años 80, cuando comenzaron a establecerse compañías fotovoltaicas en los Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) estableció los métodos y estándares de prueba y funcionamiento para los módulos fotovoltaicos. Estas actividades ayudaron a las compañías a reducir sus costos y mejorar funcionamiento, eficiencia y confiabilidad.

En México, el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) ha sido pionero del desarrollo fotovoltaico desde hace más de 25 años, período en el que se han fabricado tanto celdas de silicio cristalino como módulos fotovoltaicos a nivel de planta piloto. No obstante, no se ha llegado a la fabricación en serie, más bien el objetivo ha sido demostrar la disponibilidad tecnológica para la producción de celdas con vistas a su industrialización; sin embargo, la tecnología utilizada es prácticamente artesanal y los elementos de producción limitados, aún cuando varios módulos han sido instalados, principalmente por dependencias gubernamentales. Otras Instituciones como el Laboratorio de Energía Solar (hoy Centro de Investigación en Energía) y el Instituto de Física, ambas de la UNAM, han desarrollado cierta actividad, principalmente en la tecnología de películas delgadas, probando diferentes técnicas de deposición y analizando varios compuestos. A la fecha no han logrado obtener prototipos, motivo por el que se puede aseverar que el desarrollo fotovoltaico en México es realmente incipiente.

Respecto a los equipos periféricos y de control utilizados en los sistemas fotovoltaicos que se han instalado en México, se puede decir que la tecnología actual está completamente asimilada. Existen empresas nacionales (Condumex, ahora IEM, Grupo PIM y ACUMEX entre otras) que fabrican comercialmente controladores, centros de carga y demás componentes electrónicos para diferentes capacidades y condiciones de operación. Análogamente a los controladores de carga, la tecnología de los inversores de corriente está ampliamente asimilada. En México la mayoría de las unidades de autotransporte de primera clase utilizan inversores de fabricación nacional para los diversos servicios que brindan a bordo. La actividad en los centros de investigación mexicanos es prácticamente nula en este aspecto, dado que esta fracción de la tecnología fotovoltaica no es vanguardista.<sup>1</sup>

### 2.2.1 Componentes de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico básico se encuentra formado por cuatro bloques principales: generación de energía, almacenamiento de la energía, acondicionamiento y cargas (ver figura 2.6).

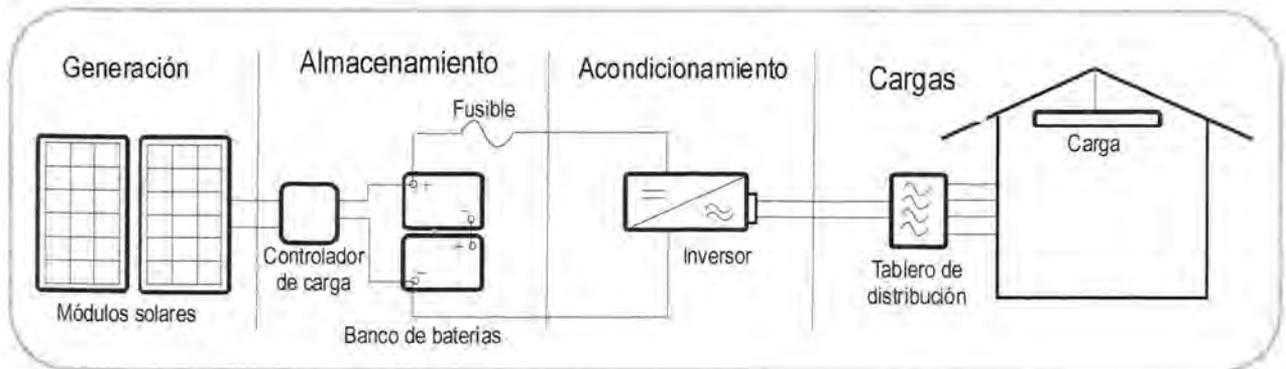
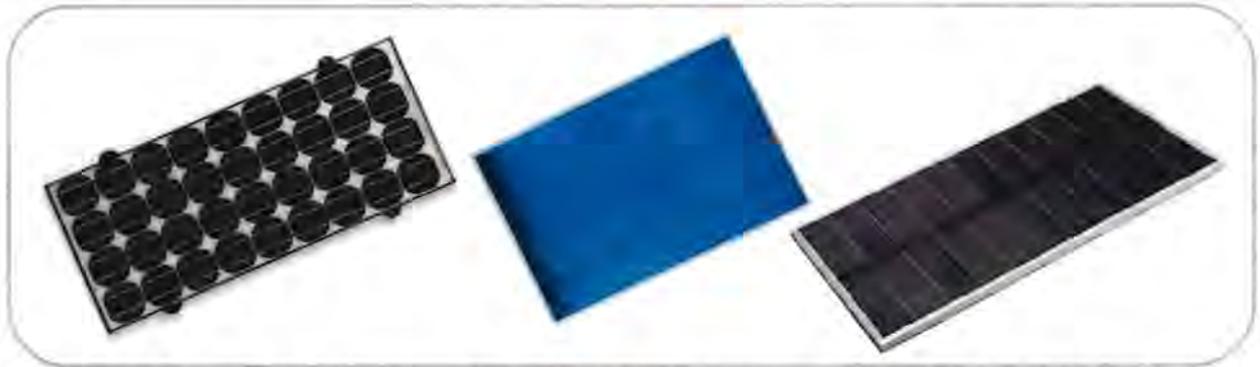


Figura 2.6 Diagrama de los componentes de un sistema fotovoltaico básico.

<sup>1</sup> CONAE; Energías renovables



**Bloque de generación:** Los módulos fotovoltaicos forman el bloque de generación. El número de ellos depende de varios factores. Entre ellos, los más obvios, son la insolación del lugar, el valor energético de la carga y la máxima potencia de salida por módulo. Su acción es equivalente al de un generador de corriente continua alimentado por la luz solar. La mayor parte de la energía eléctrica que generan es almacenada en las baterías; ya que es imposible almacenar toda la energía generada, debido a las pérdidas asociadas con el proceso de carga. Es importante recordar que si los módulos permanecen parcialmente sombreados durante una parte del día, su capacidad generadora baja sensiblemente, ya que la parte sombreada equivale a conectar un alto valor de resistencia en serie con el generador.



**Figura 2.7** Fotografía de diferentes tipos de módulos solares; monocristalino (izquierda) policristalino (centro) y amorfo (derecha).

Los módulos fotovoltaicos pueden clasificarse de acuerdo con su composición de sus celdas de silicio en, policristalino, monocristalino y amorfo (ver figura 2.7).

Las celdas de silicio monocristalino se obtienen a partir de barras cilíndricas de silicio monocristalino producidas en hornos especiales. Las celdas se obtienen por cortado de las barras en forma de obleas cuadradas delgadas (0.4-0.5 mm de espesor). Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad es superior al 12%.

Las celdas de silicio policristalino se obtienen a partir de bloques de silicio obtenidos por fusión de trozos de silicio puro en moldes especiales. En los moldes, el silicio se enfría lentamente, solidificándose. En este proceso, los átomos no se organizan en un único cristal. Se forma una estructura policristalina con superficies de separación entre los cristales. Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad es algo menor a las de silicio monocristalino.

Las celdas de silicio amorfo se obtienen mediante la deposición de capas muy delgadas de silicio sobre superficies de vidrio o metal. Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad varía entre un 5 y un 7%

La irradiancia solar afecta la corriente y la potencia del módulo fotovoltaico en forma proporcional, pero no afecta el voltaje apreciablemente. Por ejemplo, un módulo fotovoltaico puede producir solamente el 50% de su potencia nominal cuando la irradiancia solar es de 0.5 kW/m<sup>2</sup>. La temperatura de la celda de un módulo fotovoltaico afecta al voltaje y la potencia del módulo, pero el efecto es menor. Se puede esperar una reducción en voltaje y potencia de aproximadamente de 0.5% por cada grado centígrado de las celdas por encima de 25 °C. Los módulos operan típicamente a una temperatura cercana a 55 °C; esto significa que sólo pueden producir 85% de la potencia nominal a plena irradiancia solar.

**Bloque de almacenamiento:** El bloque de almacenamiento contiene tres componentes: el banco de baterías, el control de carga y el fusible de protección. El banco de almacenamiento usa, casi con exclusividad, un tipo especial de batería llamada batería solar. Estas se ofrecen en versiones de 6 y 12 V. El control de carga cumple dos funciones: garantiza un régimen de carga adecuado para las baterías, y evita la descarga de las mismas a través de los módulos durante la noche, cuando el voltaje de salida es nulo.

Su función es análoga a la del sistema de carga de batería en un automotor. Si no se usara un control el régimen de carga se podría sobrecargar las baterías. Esta condición acorta la vida útil de las mismas. Muchos fabricantes de controles de carga adicionan, en algunos modelos, funciones auxiliares dentro del producto. La más común es la de monitoreo del proceso de carga.



*Figura 2.8 Fotografía de tipos de controladores de carga.*



*Figura 2.9 Fotografía de un banco de baterías.*

El fusible de baterías es incorporado al sistema como un elemento de seguridad. Aún cuando el banco consista de una sola unidad, un cortocircuito accidental entre los bornes de salida significa que la corriente que circula por la batería alcanzará valores de miles de amperes, por varios segundos, acelerando la reacción química y disipación de calor dentro de la misma. Los gases generados no escapan en su totalidad, llegando a producir una violenta explosión. Como las baterías utilizan electrolitos altamente corrosivos, las consecuencias pueden ser trágicas. Los cortocircuitos que no terminan en explosiones acortan la vida útil de las baterías y pueden dañar el aislamiento de los cables de conexión (excesivas pérdidas de calor).

**Bloque de acondicionamiento:** El componente principal de este bloque es el inversor; debido a que la corriente producida por los sistemas fotovoltaicos es continua, y que la gran mayoría de los aparatos eléctricos funcionan con corriente alterna, es necesario acondicionar el sistema fotovoltaico para que los equipos eléctricos trabajen en óptimas condiciones.

Un inversor es un dispositivo electrónico que convierte la energía eléctrica de corriente directa a corriente alterna. En algunos casos se puede encontrar el mismo término para equipos que convierten la corriente alterna a directa aunque en este caso el término correcto es rectificador. Se pueden clasificar básicamente por su potencia nominal de salida, sin embargo existen otros parámetros a considerar como son: El tipo de onda: cuadrada, senoidal, senoidal modificada (cuasi - senoidal), voltaje para protecciones, opciones como la de inversor - cargador, etc. En la figura 2.10 se muestra una fotografía de un inversor.



**Figura 2.10** Fotografía de inversor Xantrex DR Series.

**Bloque de cargas:** El bloque de cargas representa los circuitos de entrada y de la instalación. El tablero de distribución permite la separación de las áreas de consumo. El uso de tableros de distribución facilitan la desconexión de una sección en caso de necesitarse reparar o ampliar esa parte del circuito. Esta opción es muy ventajosa cuando esa sección sufre un cortocircuito, ya que puede contarse con energía eléctrica en otra sección de la casa. Otra ventaja es que la corriente de cortocircuito de un sector es siempre menor que la del total de la carga. Esta división de la corriente de carga, abarata el costo de la instalación. Entre las cargas más comunes se pueden mencionar, lámparas, bombas de agua, ventiladores, etc. (ver figura 2.11).



**Figura 2.11** Fotografía cargas comunes en sistemas fotovoltaicos.



## 2.3 Sistema eólico

Para transformar la energía eólica en energía mecánica y/o eléctrica, un sistema de conversión de energía eólica (SCEE) capta la energía cinética del viento a través de su rotor aerodinámico y la transforma en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha principal. Esta energía mecánica comúnmente es acondicionada (valores de torque y velocidad, y/o tipo de movimiento) mediante una caja de engranes (u otro mecanismo), antes de transmitirla a la flecha de un generador eléctrico o a una bomba mecánica.

En el caso de las aplicaciones para generación eléctrica los tipos de rotor más convenientes son los de velocidad alta, dado que en este tipo de aplicaciones el inicio de operación del rotor se da en condiciones de cero carga y, la velocidad de operación de los generadores eléctricos es alta. Asimismo se pueden obtener coeficientes de potencia mayores y esto, en muchos casos, es altamente significativo en la economía de los proyectos.

Con base en estos antecedentes, los conceptos fundamentales sobre la configuración y la operación de SCEE pueden ser asimilados a partir del análisis de estas máquinas en su modalidad de aerogeneradores. Por otro lado, la tendencia y el desarrollo en general de la tecnología eoloelectrica actualmente se esta dando en esta vertiente, independientemente de que el uso último que se de a la energía sea para bombeo de agua o para generación de electricidad.

Para fines de estudio de este trabajo se tratan los aspectos fundamentales de los SCEE desde la perspectiva de la aplicación de estas máquinas como sistemas de generación eléctrica (aerogeneradores).

Por su aplicación (y capacidad nominal) los aerogeneradores se pueden clasificar en:

- \* Aerogeneradores para aplicaciones aisladas
- \* Aerogeneradores para centrales eoloelectricas.

Los aerogeneradores para aplicaciones aisladas generalmente son máquinas pequeñas que se utilizan para alimentar cargas alejadas de las redes eléctricas convencionales (*ver figura 2.12*). Típicamente, se combinan con bancos de baterías para almacenar la electricidad que generan y poder acoplar en el tiempo la generación con la demanda. En el mercado actualmente estas se ofrecen con una capacidad unitaria inferior a 35 kW, pero se pueden integrar arreglos con varias unidades para suministrar energía eléctrica a cargas mayores (por ejemplo para electrificación rural). Con frecuencia, este tipo de aerogeneradores se combinan con generadores diesel para proveer una función de respaldo y, dependiendo de las necesidades de suministro de electricidad y de la disponibilidad de los recursos energéticos no convencionales, se pueden combinar también con sistemas fotovoltaicos, microturbinas hidráulicas y otros.

Los aerogeneradores para centrales eoloelectricas son máquinas de tamaño considerable que típicamente se conectan a una red eléctrica convencional para contribuir a la alimentación de cargas específicas de capacidad importante o para construir centrales eoloelectrica. En el mercado actual se ofrecen en capacidades que van de 200 a 1500 kW (*ver figura 2.13*).



**Figura 2.12** Fotografía de un aerogenerador para aplicaciones aisladas.



**Figura 2.13** Fotografía de un aerogenerador para centrales eoloeléctricas.

Por su apariencia los dos tipos de aerogeneradores son muy similares; sin embargo, en el detalle, existen diferencias técnicas importantes en relación con su diseño y funcionalidad. No obstante, el principio fundamental básico es el mismo para ambos.

A lo largo del tiempo se han propuesto y probado una gran variedad de conceptos de aerogeneradores. Sin embargo, los aerogeneradores de eje horizontal, como los de las figuras 2.12 y 2.13, son los únicos que han alcanzado un grado de madurez aceptable tanto en lo técnico como en lo económico. En estas máquinas, el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento.

Con base en el concepto de eje horizontal se han desarrollado diversos modelos de aerogeneradores, los cuales esencialmente difieren en el número de aspas de su rotor, su orientación al viento, los subsistemas de transformación mecánico-eléctrico y los subsistemas de control y regulación de velocidad y potencia, entre otros.



Comercialmente existen una amplia variedad de modelos de aerogeneradores de eje horizontal. Algunas de las diferencias entre ellos son:

- \* El tipo de subsistemas que se utilizan para la conversión mecánico-eléctrica.
- \* Los métodos utilizados para controlar la rotación.
- \* El número y características de las aspas con las que se construye el rotor.
- \* El tipo y número de mecanismos de seguridad.
- \* Los subsistemas utilizados para incrementar la eficiencia y la confiabilidad de la máquina.
- \* Los métodos, elementos y subsistemas que se usan para acondicionar la conexión a la red eléctrica y/o mejorar la calidad de la energía generada; en el caso de aerogeneradores para centrales eolieléctricas.
- \* Los métodos y elementos que se utilizan para reducir efectos que limitan su aceptación pública

### 2.3.1 Configuración general de los aerogeneradores

Los principales subsistemas que conforman un aerogenerador de eje horizontal son los siguientes (ver figura 2.14):

- \* Rotor (aspas, cubo y nariz).
- \* Tren de potencia (flecha principal, caja de engranes y acoplamiento).
- \* Generador eléctrico.
- \* Subsistema de orientación al viento.
- \* Subsistema de regularización de potencia.
- \* Subsistemas de seguridad (frenos).
- \* Chasis principal.
- \* Torre.

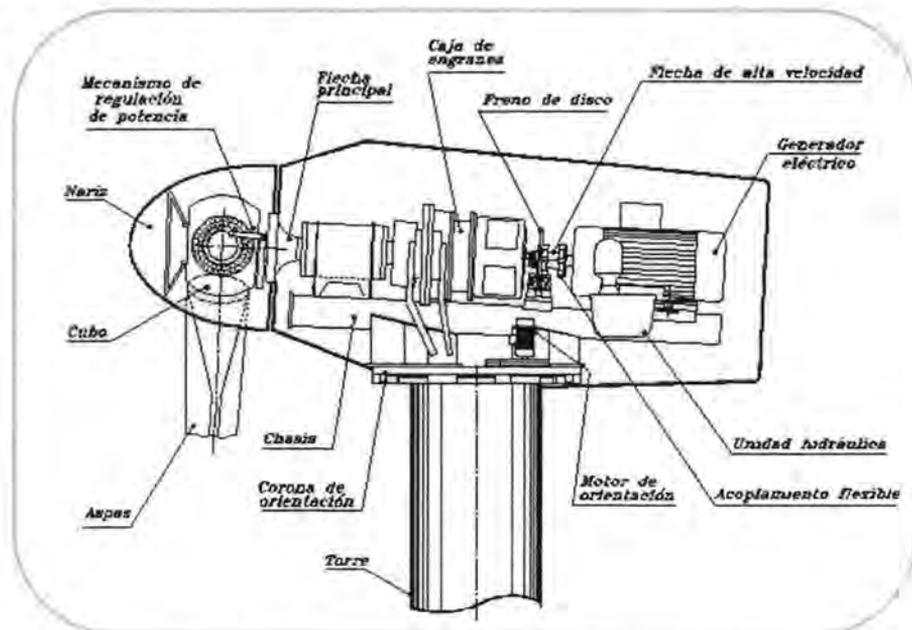


Figura 2.14 Esquema de los subsistemas de un aerogenerador.



Típicamente, el rotor aerodinámico está formado por un conjunto de dos o tres aspas. Por razones de diseño estructural y aerodinámico, la velocidad en el extremo del aspa se limita a valores entre 40 y 80 m/s. Por lo que si se usan generadores eléctricos convencionales que operan a velocidades nominales altas (1200, 1800 r.p.m.), es necesario utilizar una caja de engranes (multiplicador de velocidad) para efectuar el acoplamiento entre la flecha del rotor y el generador eléctrico.

Los aerogeneradores de eje horizontal cuentan con un subsistema dedicado a cuidar que el plano del rotor se mantenga en posición perpendicular a la dirección del viento, ya que las desviaciones al respecto reducen la cantidad de energía eólica que éste puede capturar. Los aerogeneradores de potencia media y de gran potencia utilizan sistemas activos basados en servomecanismos en contraposición a los de pequeña capacidad, los cuales en su mayoría son controlados aerodinámicamente.

El chasis principal de un aerogenerador es la estructura (metálica) donde se monta el tren de potencia, el generador eléctrico, y en su caso, las mordazas del freno y las unidades hidráulicas. Éste recibe las cargas del rotor a través del tren de potencia y las transmite a la torre via el subsistema de orientación.

Como cualquier sistema electromecánico, un aerogenerador tiene límites operativos que son función de la relación eficiencia-resistencia-costo, la cual está implícita en su diseño. Por lo anterior, se hace necesario limitar su velocidad de rotación y su potencia de salida a niveles que no pongan en riesgo su integridad física. Los métodos empleados para ese propósito van desde los diseños pasivos (i.e. aspas fijas diseñadas para abatir aerodinámicamente la velocidad angular del rotor a partir de una velocidad del viento específica), hasta el uso de servomecanismos para controlar el ángulo en que el perfil aerodinámico de las aspas se presenta al viento.

Los aerogeneradores de potencia media y de gran potencia cuentan con dos o más subsistemas de seguridad enfocados a minimizar la ocurrencia de fallas que pudieran traducirse en daño a los humanos, así como a salvaguardar la integridad física del equipo.

Todos los aerogeneradores de mediana y gran potencia cuentan con un sistema electrónico dedicado al control y a la adquisición de datos. El control de los parámetros operacionales de cada generador se lleva a cabo en el ámbito local de la máquina.

Un aerogenerador de eje horizontal, el rotor aerodinámico el tren de potencia y el generador eléctrico se instalan sobre una torre de altura considerable para tomar ventaja del incremento de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno y, por consecuencia, de su mayor contenido energético. En aerogeneradores para centrales eoloelectricas se utilizan torres que alcanzan de 40 a 60 metros de altura. La cantidad de energía que se puede ganar depende del régimen del viento en el sitio y de las características del terreno.

Para instalar aerogeneradores (de eje horizontal) se pueden utilizar torres tubulares o torres de celosía (ver figura 2.15 y figura 2.16).



Figura 2.15 Fotografía de una torre de celosía.



Figura 2.16 Fotografía de una torre tubular.

#### Torres tubulares:

Entre sus principales ventajas se tienen:

- \* Proporcionan el medio de protección e instalación para equipos de control y sistemas eléctricos en piso (fijos a la Tierra).
- \* Se pueden integrar medios muy seguros para que el personal de mantenimiento suba al chasis.
- \* Su comportamiento dinámico es relativamente sencillo.
- \* Su aspecto estético es agradable y moderno.
- \* Su instalación es fácil y rápida.
- \* Requieren poco mantenimiento.
- \* Su base ocupa poco espacio.

Entre sus principales desventajas se tienen:

- \* Tienen un costo relativamente alto.
- \* Su fabricación requiere maquinaria especializada.
- \* Su transportación es más difícil y costosa.
- \* Por su volumen, el transporte terrestre de torres tubulares para aerogeneradores grandes (del orden de MW) tiene limitaciones importantes.



**Torres de celosía:** En las torres de celosía es necesario verificar periódicamente que en las uniones de todos los perfiles angulares los tornillos se mantengan apretados adecuadamente. Esto es necesario para que se conserve la frecuencia natural de diseño y se eviten problemas de resonancia mecánica. Por ello, este tipo de torres no se utiliza en sistemas grandes (i.e., con capacidades de MW). Además, su rigidez limita su capacidad para absorber fluctuaciones de carga. En estas torres, el acceso al chasis se realiza por medio de escaleras tipo marino, montadas sobre un costado. A pesar de que cuentan con protecciones, subir a ellas en condiciones de baja temperatura y vientos intensos tiene un grado de dificultad importante. Esta es una de las razones por las que en los países del norte de Europa prácticamente no se utilizan.

Entre sus principales ventajas se tienen:

- \* Tienen un costo relativamente bajo.
- \* Son fáciles de construir ya que típicamente están formadas por perfiles angulares de acero.
- \* Son fáciles de transportar, prácticamente en cualquier tamaño.

Entre sus principales desventajas se tienen:

- \* Requieren mantenimiento constante.
- \* Son rígidas.
- \* Requieren de un medio adicional para la instalación del equipo electrónico de piso.
- \* El acceso al chasis principal implica riesgos altos en condiciones climáticas adversas.

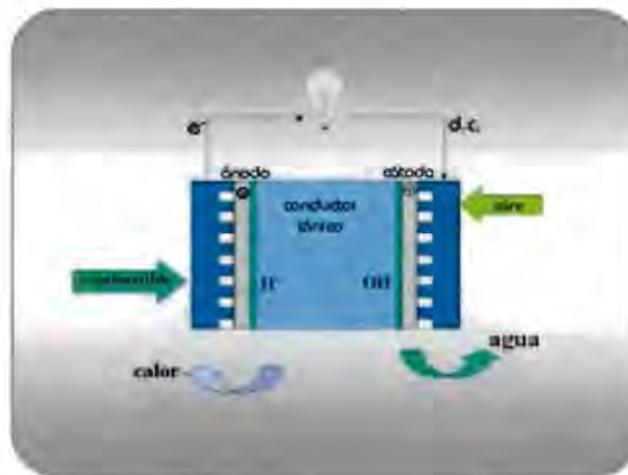
En la actualidad la tecnología de los generadores eólicos ya se puede conseguir con una cierta facilidad en el mercado local, esto se debe a que este tipo de tecnología ya es desarrollada por diversas empresas entre las cuales se pueden mencionar: Vestas, Southwest Windpower, Whisper Wind Generators, etc. Y al igual que la tecnología fotovoltaica estos dos tipos de tecnología han superado la etapa de laboratorio y cada vez alcanzan mayor popularidad en el mercado de generación de energía eléctrica.

## 2.4 Celdas de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico en el cual la energía química de un combustible es convertida en electricidad sin ninguna combustión (ver figura 2.17). Las celdas de combustible se parecen a una pila ya que sus principales componentes son dos electrodos (ánodo y cátodo) separados por un conductor iónico (electrolito). La diferencia básica entre una celda de combustible y una pila es que ésta última contiene internamente el material reactivo ó "combustible", mientras que a la celda de combustible se le alimenta externamente y de manera continua. Esta característica hace posible considerar a las celdas de combustible como generadores de electricidad continuos que no requieren recarga como en el caso de pilas secundarias.

A medida que el combustible es alimentado a la celda de combustible, aquel será oxidado en el ánodo generando una corriente de electrones ó electricidad la cual circulará externamente, aprovechándose así para realizar algún tipo de trabajo.

El retorno de tal corriente eléctrica ocurre del lado del cátodo, en donde los electrones transforman el oxígeno del aire para que éste forme junto con el hidrógeno oxidado agua 100% pura.



**Figura 2.17** Esquema del funcionamiento básico de una celda de combustible.

A diferencia de las máquinas de combustión interna en donde la energía química es extraída mediante la "quema" del combustible y convertida en diversas formas de energía antes de ser aprovechada, las celdas de combustible no queman un combustible sino que lo transforman electroquímicamente, generando electricidad, agua y calor.

Tradicionalmente el desarrollo de las celdas de combustible había sido dirigido a sistemas con alta confiabilidad pero tienen un alto costo, tal es el caso de las misiones espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica Espacial (NASA por sus siglas en inglés).



Existen dos aspectos importantes en aplicaciones basadas en tecnología de celdas de combustible: sus costos iniciales y la infraestructura requerida para su dicho uso. El primer aspecto se encuentra relacionado directamente con el costo de fabricación de las celdas de combustible y los sistemas que integran las aplicaciones específicamente. En el caso de la infraestructura requerida, es claro que la disponibilidad del combustible, idealmente hidrógeno, no ha tenido un desarrollo extendido quizá principalmente porque no se había requerido en esta sociedad basada en el uso de combustibles fósiles.

### 2.4.1 Materiales en las celdas de combustible tipo PEM

El aspecto relevante que puede influir en el pronto uso de las celdas de combustible es el costo inicial de éstas. Esto es muy relevante para el tipo de celda de membrana, ya que se vislumbra como aquella con mayor potencial para entrar a ciertos mercados antes que otro tipo de celdas. Este tipo de celdas es también el de mayor costo inicial por el tipo de materiales que emplea.

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico o de electrolito de membrana polimérica (PEM por sus siglas en inglés) han atraído la mayor de las atenciones en el desarrollo de tecnologías basadas en la generación de energía eléctrica de celdas de combustible. De los varios sistemas de celdas de combustibles considerados, las celdas PEM (ver tabla 2.1) son las más adecuadas para aplicaciones de transporte terrestre, energía portátil y sistemas de generación tipo residencial.

**Tabla 2.1** Aplicaciones de celdas de combustible de acuerdo al tipo de celda.

POTENCIA	TIPO DE APLICACIÓN	EJEMPLOS	TIPO DE CELDA *
< 1 kW	Básica estacionaria y portátil	Iluminación, refrigeración, bombeo, radio comunicación, telefonía celular	PEM
1kW – 10 kW	Estacionaria	Uso residencial, estaciones de trabajo y computadoras personales, UPS, equipo digital	PEM / SOFC
10kW – 250kW	Estacionaria (generación distribuida) y transporte	Pequeñas comunidades, uso comercial como oficinas, bancos y hospitales, autos y autobuses	PAFC / PEM / SOFC
250kW – 1MW	Estacionaria (generación distribuida)	Residencial, comercial e industrial	SOFC / MCFC
> 1MW	Estacionaria (gen. dist. y centralizada)	Cualquier uso	SOFC / MCFC

\* PEM = Celda de membrana de intercambio protónico (80 °C)  
 PAFC = Celda de ácido fosfórico (200 °C)  
 MCFC = Celda de carbonatos fundidos (600 °C)  
 SOFC = Celda de óxido sólido (1000 °C)

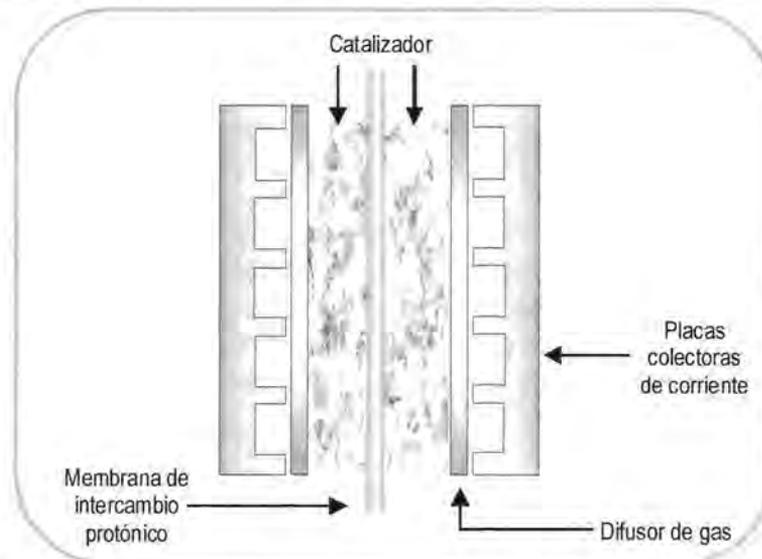


La celda tipo PEM una de las más confiables gracias a varias de sus características, como baja temperatura (80 °C) y, por lo tanto, su rápido tiempo de arranque en frío; perfecta tolerancia de su electrolito a gas  $\text{CO}_2$  y la combinación de una alta densidad de potencia y una alta eficiencia de conversión de energía. El componente que le da el nombre a este tipo de celda es típicamente un polímero intercambiador de protones, con baja permeabilidad de los gases reactivos de esta celda: hidrógeno y oxígeno.

### 2.4.2 Descripción general de la celda PEM

Los componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM pueden ser resumidos como: dos electrodos impregnados con electrolizador (típicamente platino), la membrana conductora de protones y finalmente las placas colectoras de corriente. En realidad estos componentes, además de tener más de una función, tienen un gran contenido de ingeniería de diseño y de manufactura, sin ellos, el alto desempeño práctico que hoy presentan no se hubiese alcanzado.

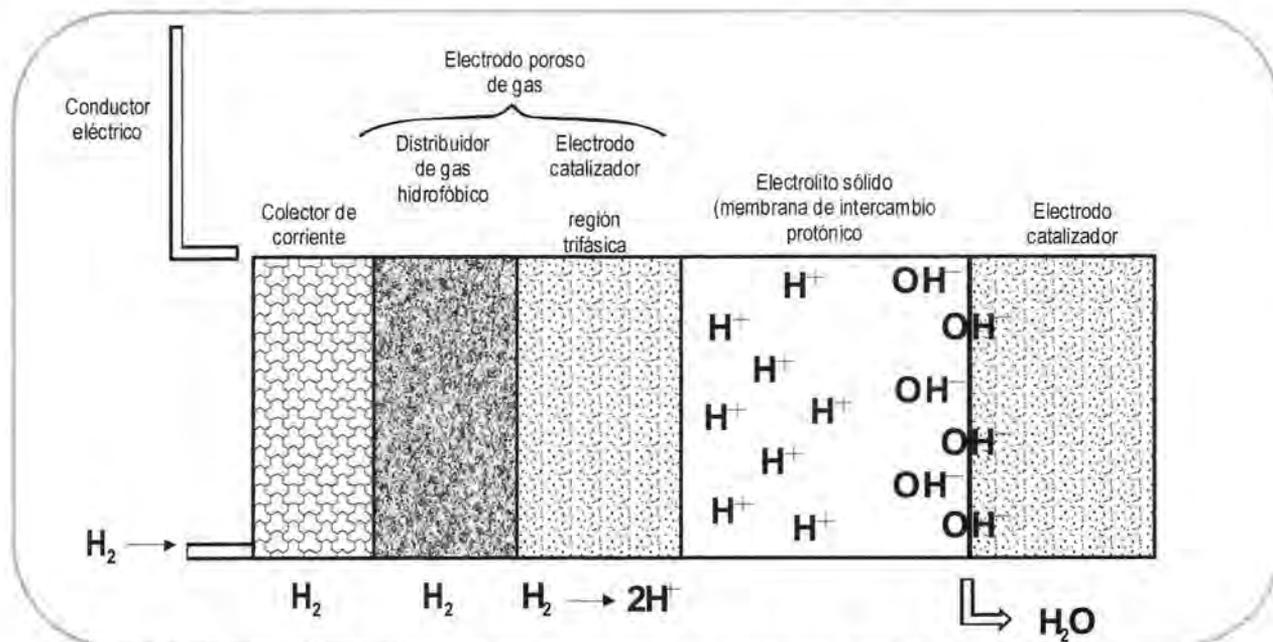
La figura 2.18 es un diagrama de una celda de combustible tipo PEM, en donde se muestra un ensamble de los electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito. El corazón de la celda es el llamado ensamble de los electrodo-membrana o MEA (Membran Electrode Assembly por sus siglas en inglés). En su forma más simple, el electrodo de este ensamble es una capa delgada de unos 5 a 50  $\mu\text{m}$  de espesor, el cual contiene un catalizador de platino disperso en él. Esta capa catalizadora está en íntimo contacto con una membrana ionomérica, la cual sirve como electrolito y como separador de los gases reactivos y de los electrodos de las celdas.



**Figura 2.18** Esquema de los componentes básicos de una celda de combustible tipo PEM.



La acción del electrolizador es quizás una de las importantes ya que sin él no habría ninguna reacción electroquímica. El electrolizador tiene como función esencial promover la oxidación del hidrógeno en el ánodo (ver figura 2.19) y la reducción de oxígeno en el cátodo de la celda. Así una MEA consiste de una membrana ionomérica con capas delgadas de catalizador a cada lado de ella (superficies mayores), con una estructura de una celda electroquímica, electrodo-electrolito-electrodo empacada en forma de un emparedado de tres capas.



**Figura 2.19** Esquema del recorrido del hidrógeno en una celda PEM, a través de sus diferentes componentes.

**Membrana intercambiadora de protones:** La membrana polimérica conductora de protones es quizás el elemento más especial de las celdas PEM. Ésta tiene como función el transporte de carga iónica en el circuito de la celda electroquímica formada. Es el equivalente al ácido sulfúrico de las baterías automotrices, con la ventaja de no ser corrosiva, ser sólida y de fácil manejo; además, tiene otras funciones como la separación de los gases combustible y oxidante y también de aislar eléctricamente a los dos electrodos.

Una característica importante de este material es el hecho de que la membrana debe encontrarse humidificada al punto de saturación para ofrecer las mejores características de conducción protónica. Al inicio debe ser tratada químicamente para sulfonar al polímero, ya que son los grupos sulfónicos los encargados de intercambiar protones dentro de la membrana.

**Difusor de gas:** Es la capa contigua al electrolizador que se halla en contacto con la membrana. El difusor de gas está hecho de tejido de carbón o de papel carbón poroso, el cual es tratado politetrafluoroetileno (PTFE) para hacerlo hidrofóbico del lado opuesto a la membrana. Esta capa difusora de gas puede llegar a tener espesores del orden de 100 a 300  $\mu m$ . La función de este componente es la de permitir un acceso directo y uniforme de los gases reactantes a la región del catalizador sin que éstos se tengan que difundir a través de capas de agua líquida. El lado hidrofóbico impide el paso de agua líquida desde la membrana hacia el exterior de la MEA lo cual podría provocar el taponamiento de los accesos del gas entrante.



Otro efecto adicional negativo es la pérdida excesiva de humedad en la membrana, que requiere estar saturada de agua para tener su máxima conductividad iónica. El difusor debe además ser un material altamente conductor y de fácil manejo para fabricación de celdas. Este componente, junto con los colectores de corriente, se halla a los lados de la MEA para formar una monocelda. Cuando varias monoceldas se encuentran acopladas en serie (arreglo más común) o paralelo forman una celda de combustible de potencia útil. En la práctica, varias monoceldas son acopladas para obtener el voltaje deseado para cada aplicación, ya que una monocelda genera únicamente alrededor de 0.7 volts.

**Placas colectoras de corriente:** Una monocelda se completa cuando se integran placas colectoras de corriente a una MEA. Las placas colectoras de corriente son precisamente quienes reúnen la corriente generada en todos los puntos de reacción a ambos lados de la membrana, es decir, en los electrodos y que es transferida mediante los difusores de gas. Las placas colectoras de corriente son maquinadas para contener canales o campos por donde fluyan los gases que deben ser distribuidos por los difusores de gas. Estas placas, son hechas tradicionalmente de grafito de alta densidad embebido en un material resinoso, operan en modo bipolar en monoceldas acopladas en serie en cuyo caso tienen maquinadas ambas caras. Esta placa tiene que ser, por lo tanto, impermeable a ambos gases, hidrógeno y oxígeno.

**Electrocatalizador:** En la parte central de una celda de combustible tipo PEM, una capa de electrolizador se encuentra adyacente a cada lado de la superficie de la membrana (*ver figura 2.18*). Este electrocatalizador, normalmente platino (Pt), es aplicado en forma de suspensión, que consiste del propio metal, carbón de alta superficie específica y una solución de una versión soluble de la membrana (solución alcohólica). Este tipo de configuración consiste básicamente de Pt soportado en una estructura conductora de carbón (negro de humo de alta superficie específica,  $220 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ). La mezcla es preparada mediante métodos usados en química coloidal, usando Pt de alrededor de 2 nm de diámetro y partículas de carbón (C) de 10 nm de diámetro. El Pt/C de estar íntimamente intermezclado con el ionómero ya curado, para proveer suficiente conductividad iónica (protónica) dentro de esta capa.



## 2.5 Generalidades sobre los sistemas híbridos

**Normas y especificaciones para el diseño y construcción de sistemas híbridos:** Durante los últimos años, se han realizado mejoras significativas y se han estandarizado como especificaciones para los sistemas fotovoltaicos. La mayoría de estas especificaciones pueden utilizarse también en los sistemas híbridos. No obstante, por ahora no todos los aspectos se cubren plenamente por las normas existentes (norma NEC de Estados Unidos o la NOM-001-SEDE en México) y especificaciones adicionales deben ser desarrolladas. La estrategia de control de la energía es una parte clave en el funcionamiento del sistema híbrido. La confiabilidad del servicio, la vida del banco de baterías, el consumo de combustible y por consiguiente el costo de generación de la electricidad depende fuertemente de la estrategia de control durante el funcionamiento.

**Parámetros técnicos, económicos y ambientales del almacenamiento de energía:** Las baterías de plomo-ácido son las más utilizadas para el almacenamiento de energía en los sistemas híbridos. En algunos casos, las baterías de níquel-cadmio se usan como una alternativa. Ambos tipos de baterías requieren un alto costo. Adicionalmente, ambas baterías son muy sensibles a condiciones de operación inesperadas. En realidad la vida de las baterías en los sistemas oscila entre los 3 a 5 años, lo cual provoca mayor costo que el estimado en el diseño del proyecto. Más problemáticos son los casos donde los usuarios no pueden reemplazar las baterías debido a que carecen de dinero, lo cual en la mayoría de los casos significa una pérdida total del funcionamiento del sistema. Ambos tipos de baterías usan metales pesados (plomo y cadmio), los cuales son tóxicos y con electrolitos químicos más o menos agresivos ( $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{KOH}$ ). Si no existe un reproceso y un reciclado muy cuidadoso, el uso de estas baterías debe considerarse como desventajas desde el punto de vista ecológico.

**Problemas técnicos de componentes en sitios remotos:** En la práctica, los componentes de todo sistema híbrido (generador diesel, equipo de potencia, reguladores de carga, cables, etc.) sufren fallas incidentales. Esto se debe generalmente a un mantenimiento inadecuado y a la dificultad de contar con personal capacitado en zonas remotas, incluso también, a que algunas veces se dejan de atender pequeñas fallas por algún periodo provocando posteriormente daños severos al sistema.

**Flexibilidad en el diseño del sistema:** En este momento, el crecimiento gradual de los sistemas híbridos es difícil. La actualización individual de componentes genera desigualdades en los flujos de energía y en casi todos los casos reduce la eficiencia global del sistema. Los módulos fotovoltaicos y la capacidad del banco de baterías sólo pueden incrementarse mediante el aumento de filas completa. Una mezcla de baterías nuevas y viejas debe evitarse tanto como sea posible. El incremento de capacidad de diesel no significa solamente la suma de otras unidades, ya que debe rediseñarse también el algoritmo de control del sistema. Además en el diseño del sistema híbrido más robusto, el personal que debe dar mantenimiento al sistema en el sitio juega un importante papel en la confiabilidad y vida del sistema; por lo menos las baterías y todos los equipos que tienen movimiento (generador diesel, aerogeneradores, etc.) necesitan un mantenimiento regular. Los requerimientos de capital para la ejecución de un proyecto de sistema híbrido son mucho más altos que para un generador diesel. Aún en los casos donde los sistemas híbridos son la opción más económica de los altos costos iniciales que a menudo son prohibitivos.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IIE; Energías renovables

### Capítulo 3: Análisis de la instalación eléctrica del hotel

En el siguiente capítulo se presenta un análisis de la instalación eléctrica del hotel, que describe el estado de la instalación y de los sistemas de generación de energía fotovoltaica. El hotel utiliza energía fotovoltaica debido a que vende un concepto de ecoturismo en donde se restringe un poco el uso de energía eléctrica, y ésta sólo es utilizada para iluminación y ventilación.

El hotel “Villas Ecotucan”, está ubicado sobre la carretera Bacalar-Cafetal, aproximadamente a 5 km de la localidad de Bacalar (ver figura 3.2), el cual se encuentra en una zona con un clima tropical, temperatura media anual de 26 °C y con un tipo de selva subperhinifolia.

El Hotel cuenta con 2 sistemas de generación fotovoltaicos independientes, uno de ellos suministra energía a cargas en CD localizado en el área de las cabañas (ver figura 3.3), y el otro a cargas en CA ubicado en el restaurante y recepción (ver figura 3.4).



Figura 3.1 Fotografía de la entrada al hotel “Villas Ecotucan”.



Figura 3.2 Mapa de ubicación geográfica del hotel “Villas Ecotucan”.



Figura 3.3 Fotografía del sistema fotovoltaico para cargas en CD.



Figura 3.4 Fotografía del sistema fotovoltaico para cargas en CA.

### 3.1 Características del sistema fotovoltaico para cargas en CD

El sistema fotovoltaico que opera en CD es el encargado de generar la energía eléctrica que alimenta a cada una de las cabañas (5 en total) del Hotel. El sistema se encuentra conformado por los siguientes componentes:

#### 3.1.1 Módulos fotovoltaicos

El sistema de generación está conformado por un arreglo de cinco módulos de silicio amorfo (ver figura 3.6), marca Bp Solarex Millennia, modelo MST-43 LV, cuyos datos de placa son lo siguientes:

Tabla 3.1 Datos de placa de los módulos.

CONCEPTO	VALOR
Potencia máxima ( $P_{max}$ )	51 W
Voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ )	23.4 V
Corriente a corto circuito ( $I_{sc}$ )	3.6 A
Voltaje a potencia máxima ( $V_{Pmax}$ )	18.3 V
Corriente a potencia máxima ( $I_{Pmax}$ )	2.7 A

Se llevaron a cabo mediciones del voltaje que registran los módulos, siendo éste de 13.30 V, lo que nos indica el 72.67% de su capacidad máxima. El estado del cableado es adecuado.

La orientación de los módulos es correcta, en dirección hacia el Sur. El ángulo de inclinación no es el adecuado ya que debe ser igual a la latitud del lugar, en este caso  $18^{\circ}45'$  aproximadamente, siendo éste igual a  $16.62^{\circ}$ , indicando una mala inclinación del arreglo que se refleja en un rendimiento menor en su potencia generada.

La ubicación de los módulos es buena debido a que no existen árboles cercanos que puedan producir sombreados sobre ellos.



Figura 3.5 Fotografía de la placa de los módulos.



Figura 3.6 Fotografía de los módulos de silicio amorfo.

### 3.1.2 Banco de baterías

El banco de baterías del arreglo fotovoltaico se encuentra conformado por 6 baterías marca Deka de la línea Unigy I modelo 12AVR-100 conectadas en paralelo (ver figuras 3.7 y 3.8), el voltaje nominal de cada una de las unidades es de 12 V con capacidad de hasta 100 A-h.



Figuras 3.7 y 3.8 Fotografías del Banco de baterías del sistema fotovoltaico.

La lectura de voltaje al banco de baterías fue igual a 12.9 V lo cual nos indican que se encuentran en buen estado de carga. Igualmente se observaron las condiciones de los cables de conducción de corriente y terminales, como se puede observar en las figuras 3.7 y 3.8, no se encontraron anomalías, sin embargo debido a que se encuentran a intemperie pueden sufrir más rápido afectaciones por el clima o insectos.

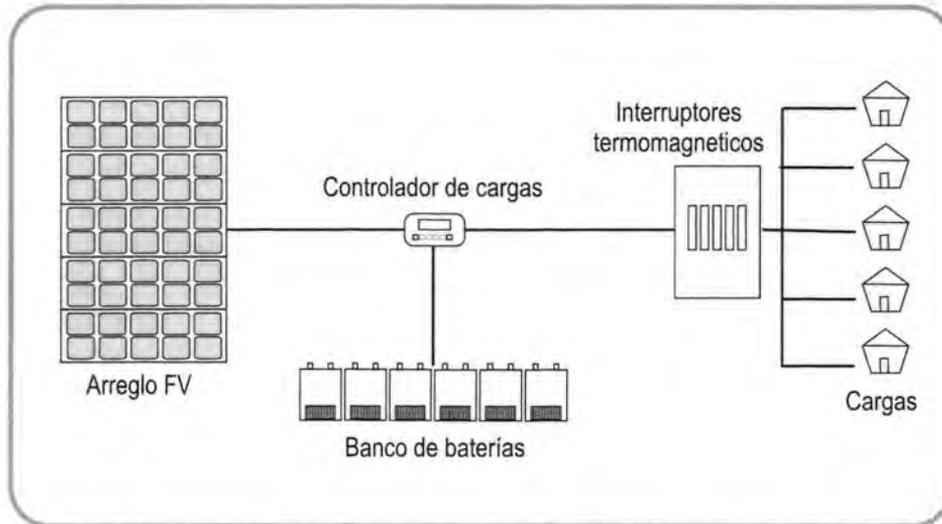
### 3.1.3 Controlador de carga

El sistema cuenta con un controlador de carga marca Econolux, modelo CCD122430 que trabaja con voltajes de 12 ó 24 V y una corriente de 30 A. Como se puede observar en las figuras 3.9 y 3.10, el controlador se encuentra casi a la intemperie lo cual no es muy recomendable ya que se encuentra expuesto a inclemencias meteorológicas e insectos, también se puede ver una mala distribución en el cableado.



Figuras 3.9 y 3.10 Fotografías del controlador de carga del sistema fotovoltaico.

### 3.1.4 Instalación eléctrica



**Figura 3.11** Esquema de la instalación eléctrica del sistema fotovoltaico para CD.

El sistema de cargas (la instalación eléctrica) se encuentra compuesto por el centro de carga (ver figuras 3.12 y 3.13), registro y tubería de distribución (ver figura 3.13), y las cargas dentro de las cabañas (ver figuras 3.15 y 3.16); cada una de las cabañas cuenta con el mismo requerimiento de energía porque todas cuentan con las mismas características en sus cargas; 4 lámparas de 30 W y 2 ventiladores de 17 W. Toda la instalación eléctrica opera a 12 V en CD.



**Figuras 3.12 y 3.13** Fotografías del centro de carga del sistema fotovoltaico.

En las figuras 3.12 y 3.13 se observa el centro de carga del sistema fotovoltaico el cual presenta algunas anomalías como: protección termomagnética para CA para cada una de las cabañas, se puede ver que no se cuenta con algún tipo de etiquetamiento o identificador para cada uno de los interruptores, otro punto es que su interior no se encuentra hermético y esto propicia la entrada de insectos como se puede observar en la figura 3.12, otro defecto más que se puede mencionar es el cable de aterrizamiento de los módulos pasa justo frente al centro de carga y tiene contacto con éste.

En lo que respecta al registro eléctrico (ver figura 3.14) en donde se lleva a cabo la distribución de las líneas de suministro de energía para cada una de las cabañas se observó que no existe una buena distribución del cableado dentro del registro así como también se tienen malos empalmes los cuales puede provocar algún corto circuito en la instalación. Es recomendable realizar una de forma identificación del cableado ya sea mediante etiquetamiento o por código de colores para evitar confusiones al llevar a cabo algún tipo de reparación o mantenimiento.



**Figura 3.14** Fotografía del registro eléctrico.

Las cargas dentro de las cabañas consisten de las mismas características; cuatro lámparas fluorescentes de 30 W de potencia y un voltaje de operación igual a 12 V (ver figura 3.15) y dos ventiladores de pedestal de 17 W de potencia y un voltaje de operación igual a 12 V (ver figura 3.16), todas las cargas de cada una de las cabañas se encuentra en buen estado de funcionamiento



**Figura 3.15 y 3.16** Fotografía de cargas que se encuentran en las cabañas



**Figura 3.17 y 3.18** Fotografías de las cabañas en las cuales se encuentran las cargas del sistema.



### 3.1.5 Dimensionamiento del sistema

Se dimensionará el sistema con las cargas existentes y el régimen de uso (ver tabla 3.1) para evaluar si el sistema fue bien calculado o está sobredimensionado, se usarán los siguientes recursos:

**Tabla 3.2** Cuadro de cargas y consumo del sistema fotovoltaico para cargas en CD.

TIPO DE CARGA	Vn (V)	Pn (W)	Ic (A)	CANTIDAD	REGIMEN DE USO (h)	CONSUMO (A-h)
Lámpara fluorescente	12	13	1.08	20	3	64.80
Ventilador	12	17	1.41	10	3	42.30
<b>TOTAL</b>						<b>107.10</b>

Para los módulos fotovoltaicos se utilizará el criterio de los amperes-hora la cual se recomienda para sistemas con voltaje nominal a 12 V.

$$N_p = \frac{E_c \cdot F_s}{H_p \cdot I_m \cdot \eta_w \cdot \eta_c \cdot \eta_{CB}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

- N<sub>p</sub> número de módulos en paralelo
- E<sub>c</sub> es la energía total a consumir por las cargas en A-h.
- F<sub>s</sub> es el factor de sobredimensionamiento (5% al 10%).
- H<sub>p</sub> recurso solar disponible en horas-pico.
- I<sub>m</sub> corriente del módulo en el punto de máxima potencia bajo condiciones STC.
- η es la eficiencia en el manejo de energía
  - η<sub>w</sub> cables (97%), η<sub>c</sub> controlador (97%),
  - η<sub>CB</sub> coulombica en batería ( 95%).

Para determinar la capacidad de almacenamiento del banco de baterías (criterio de ampere-hora) se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_B = \frac{E_c \cdot A_u}{f_u \cdot F_i} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- C<sub>B</sub> = capacidad del banco de baterías
- E<sub>c</sub> = energía consumida expresada en A-h.
- A<sub>u</sub> = autonomía del sistema expresada en días.
- f<sub>u</sub> = factor de uso de la batería
  - f<sub>u</sub> = 0.5 para placas delgadas y f<sub>u</sub> = 0.8 para placas gruesas.
- F<sub>i</sub> = factor de incremento en la capacidad debido a una razón de descarga mas lenta,
- F<sub>i</sub> =1.05 para placa delgada y F<sub>i</sub> =1.35 para placa gruesa.

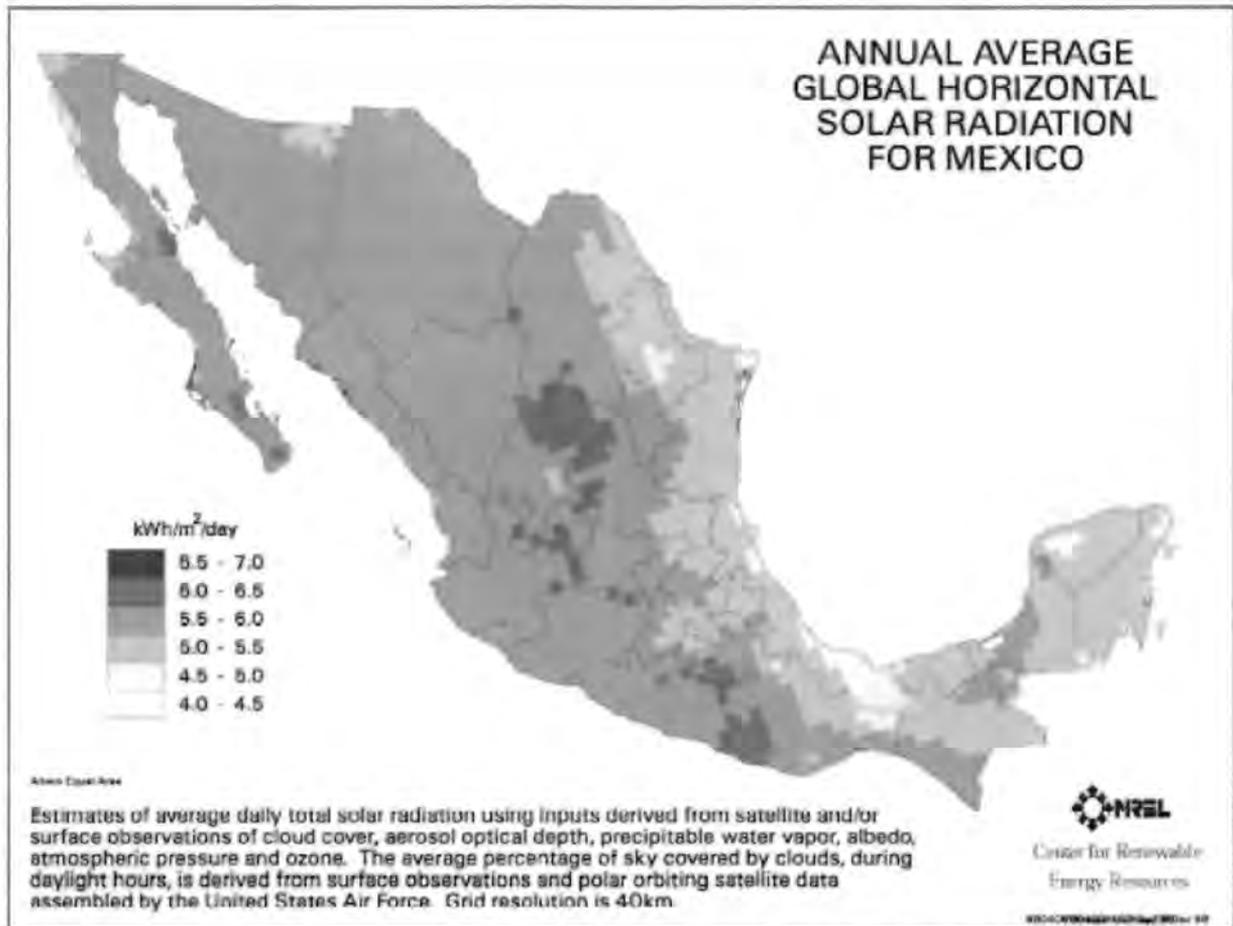


Figura 3.19 Mapa de recurso solar en México.

Considerando un recurso solar con un valor de 4.5 horas pico de acuerdo a la figura 3.19, un factor de sobredimensionamiento del 5% y sustituyendo los valores de la tabla 3.1 y la tabla 3.2 en la ecuación 1 se tiene que:

$$N_p = 10.35$$

Lo cual indica que el sistema puede estar conformado por 11 módulos fotovoltaicos del mismo tipo que los existentes

Considerando 2 días de autonomía para el banco de baterías y sustituyendo los valores de la tabla 3.2 en la ecuación 2 tenemos:

$$C_B = 408 \text{ A-h}$$

Por lo cual se estima que el banco puede estar compuesto por 5 baterías de las mismas características que las existentes (rendimiento igual a 100 a-h), conectadas en paralelo

### 3.2 Características del sistema fotovoltaico para cargas en CA

El sistema fotovoltaico para cargas en CA funciona para suministrar energía eléctrica al restaurante, cocina, baños, recepción, bodega y estancia de lectura. Este sistema es principalmente para iluminación, cuenta con más componentes en su configuración los cuales se describen a continuación:

#### 3.2.1 Módulos fotovoltaicos

El arreglo fotovoltaico se encuentra formado por 8 módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino (ver figura 3.20) marca Bp Solar modelo BP275U, con potencia nominal 75 W en condiciones estándar de prueba ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ); de 36 celdas cada uno, interconectados en paralelo.

Tabla 3.3 Datos de placa de los módulos.

CONCEPTO	VALOR
Potencia máxima ( $P_{\text{max}}$ )	75 W
Voltaje a circuito abierto ( $V_{\text{oc}}$ )	21.4 V
Corriente a corto circuito ( $I_{\text{sc}}$ )	4.75 A
Voltaje a potencia máxima ( $V_{P_{\text{max}}}$ )	17 V
Corriente a potencia máxima ( $I_{P_{\text{max}}}$ )	4.45 A

Se verificaron las condiciones del arreglo fotovoltaico, tales como, orientación, inclinación, voltaje de salida y efectos de sombreado.

Lo que respecta al cableado, se observó que se encuentra en buenas condiciones, su orientación no es la adecuada (hacia el sur) porque se encuentra desviada  $5^\circ$  hacia el suroeste, el ángulo de inclinación es igual a  $17.60^\circ$ , el cual nos indica una mala inclinación del arreglo ya que al tratarse de una inclinación fija ésta debería ser igual a la latitud del lugar, en este caso aproximadamente  $18^\circ 45'$ .

También se observó que existe un árbol ubicado al Este, el cual provoca sombreado sobre la superficie de algunos módulos fotovoltaicos, lo que provoca puntos calientes en algunas celdas (ver figura 3.21).

El arreglo fotovoltaico no cuenta con ningún medio de aterrizamiento para sobre tensiones.



Figura 3.20 Fotografía del arreglo fotovoltaico.



Figura 3.21 Fotografía del efecto de sombreado sobre el arreglo FV.

### 3.2.2 Banco de baterías

El banco de baterías del arreglo fotovoltaico se encuentra conformado por 8 baterías marca Deka de la línea Unigy I modelo 12AVR-100 conectadas en paralelo (ver figura 3.22), el voltaje de operación de cada una de las unidades es de 12 V con capacidad de hasta 100 A-h. Las baterías se encuentran dispuestas sobre una tarima de madera dentro de una bodega del hotel la cual no se considera un buen lugar ya que no cuenta con una buena ventilación. El cableado se encuentra desordenado lo cual ocasiona una mala identificación de cada uno de ellos.

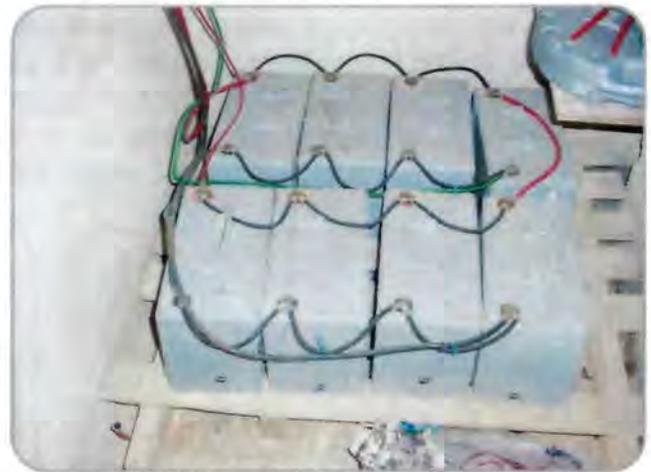


Figura 3.22 Fotografía del banco de baterías.

### 3.2.3 Controlador de carga

El Controlador de carga del arreglo fotovoltaico en CA, es de la marca Morningstar, modelo ProStar 30, el cual puede trabajar con voltajes de entrada de 12 y 24 V y cuenta con un indicador digital (ver figura 3.23). El controlador se encuentra ubicado en la misma bodega en donde están las baterías y el inversor. El controlador de carga se encuentra trabajando correctamente como el resto de toda la instalación presenta falta de estética y mala identificación del cableado (ver figura 3.24).



Figura 3.23 Fotografía de un controlador de carga marca Morningstar.



Figura 3.24 Fotografía de controlador de carga del arreglo FV.

### 3.2.4 Inversor

El equipo inversor de corriente directa a corriente alterna, se encuentra conformado por un inversor marca Statpower, modelo Portawatt 1750 (ver figura 3.25), el cual proporciona 1,500 W de potencia continua, una frecuencia de 60 Hz, la salida de voltaje es de 115 V en CA y un rango de 10 a 15 V de entrada en CD. El inversor se encuentra ubicado en la bodega del establecimiento, se encuentra trabajando correctamente pero presenta falta de estética y mala distribución del cableado (ver figura 3.26).



Figura 3.25 Fotografía de un inversor Portawatt.

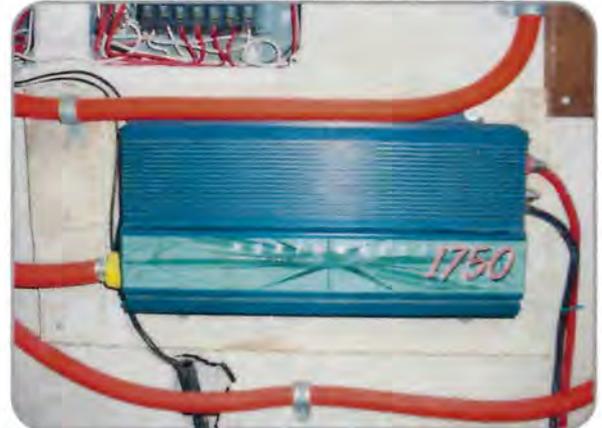


Figura 3.26 Fotografía del inversor del arreglo FV.

### 3.2.5 Instalación eléctrica

La instalación eléctrica del sistema se encuentra conformada por los centros de carga que distribuyen la energía eléctrica a los diferentes circuitos (cocina, restaurante, estancia, etc.), y también de las diferentes cargas que lo componen (lámparas). Se pudo observar que los centros de carga no tienen un medio de identificar los circuitos que protegen cada uno de los interruptores termomagnéticos, así como también una mala distribución del cableado dentro de los centros de carga y falta de tapas en cada uno de ellos (ver figura 3.27).

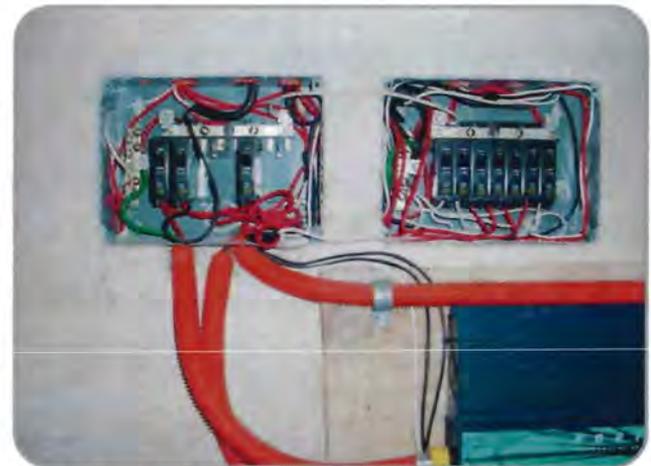


Figura 3.27 Fotografía de los centros de carga.

Las cargas que alimentan el sistema se encuentran conformadas por 9 lámparas ahorradoras de 13 W (ver figura 3.28) y 5 lámparas ahorradoras tipo circular de 24 W (ver figura 3.29), todas las lámparas trabajan bien y la instalación eléctrica que las alimenta se encuentra en buen estado



Figura 3.28 Fotografía de una lámpara de 13 W.



Figura 3.29 Fotografía de una lámpara de 24 W.

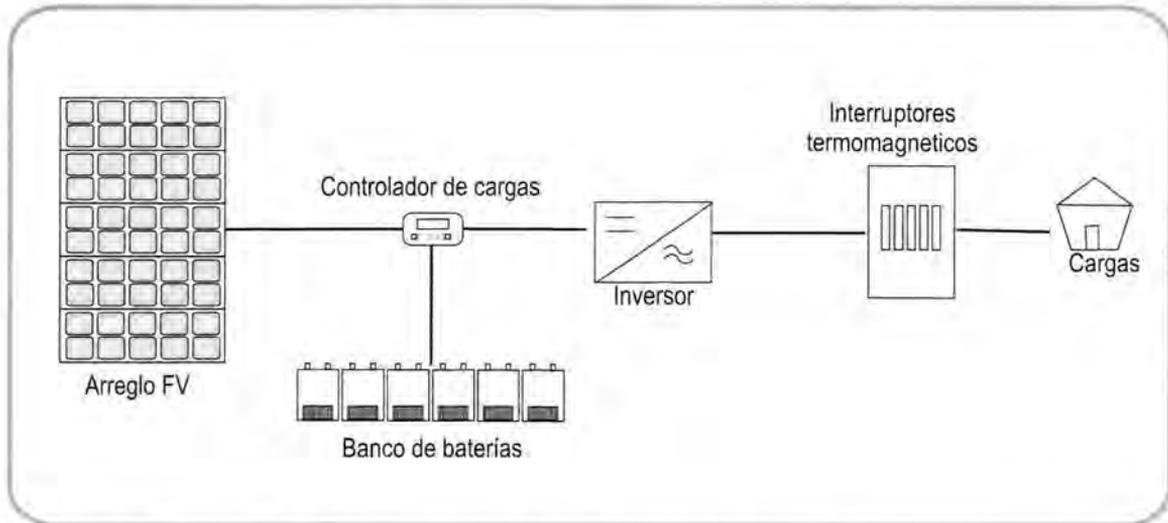


Figura 3.30 Esquema de la instalación eléctrica del sistema fotovoltaico para cargas en CA.

### 3.2.6 Dimensionamiento del sistema

Se dimensionará el sistema con las cargas existentes y el régimen de uso (ver tabla 3.4) para evaluar si el sistema fue bien calculado o está sobredimensionado, se usarán los siguientes recursos:

Tabla 3.4 Cuadro de cargas y consumo del sistema fotovoltaico para cargas en CA.

TIPO DE CARGA	Vn (V)	Pn (W)	Ic (A)	CANTIDAD	REGIMEN DE USO (h)	CONSUMO (W-h)
Lámpara fluorescente	127	13	0.10	9	4	468
Lámpara fluorescente	127	24	0.18	5	4	480
<b>TOTAL</b>						<b>948</b>

Para los módulos fotovoltaicos se utilizará el criterio de los watts-hora la cual se recomienda para sistemas con voltaje nominal mayor a 12 V.

$$M = \frac{E_c \cdot F_s}{P_M H_p \eta_w \cdot \eta_c \cdot \eta_i \cdot \eta_B \eta_T} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

M = número total de módulos a necesitar

E<sub>c</sub> = energía total a consumir por las cargas en W-h.

F<sub>s</sub> = factor de sobredimensionamiento (5% al 10%).

H<sub>p</sub> = recurso solar disponible en horas-pico.

P<sub>M</sub> = potencia pico del módulo bajo STC.

η = eficiencia en el manejo de energía:

η<sub>w</sub> cables (97%), η<sub>c</sub> controlador (97%),

η<sub>i</sub> inversor (95%), η<sub>B</sub> eficiencia global en batería (85%)

η<sub>T</sub> efecto de la temperatura (90%)



Para determinar la capacidad de almacenamiento del banco de baterías (criterio de watt-hora) se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_B = \frac{E_c \cdot A_u}{V_{n_B} \cdot f_u \cdot F_i} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

$C_B$  = capacidad del banco de baterías

$E_c$  = energía consumida expresada en W-h.

$A_u$  = autonomía del sistema expresada en días.

$V_{n_B}$  = voltaje nominal del banco de baterías.

$f_u$  = factor de uso de la batería

$f_u = 0.5$  para placas delgadas y  $f_u = 0.8$  para placas gruesas.

$F_i$  = factor de incremento en la capacidad debido a una razón de descarga mas lenta,

$F_i = 1.05$  para placa delgada y  $F_i = 1.35$  para placa gruesa.

Considerando un recurso solar con un valor de 4.5 horas pico de acuerdo a la figura 3.19, un factor de sobredimensionamiento del 5% y sustituyendo los valores de la tabla 3.3 y la tabla 3.4 en la ecuación 3 se tiene que:

$$M = 4.31$$

Lo cual indica que el sistema puede estar conformado por 5 módulos fotovoltaicos del mismo tipo que los existentes

Considerando 2 días de autonomía para el banco de baterías y sustituyendo los valores de la tabla 3.4 en la ecuación 4 tenemos:

$$C_B = 300.95 \text{ A-h}$$

Por lo cual se estima que el banco puede estar compuesto por 4 baterías de las mismas características que las existentes (rendimiento igual a 100 A-h), conectadas en paralelo.



## Capítulo 4: Propuesta de sistema híbrido

En este capítulo se realiza una propuesta de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-celdas de combustible, en el que los componentes fotovoltaico y eólico serán los principales generadores de energía para todo el Hotel (tanto para las cabañas como para el restaurante, cocina, estancia de lectura, recepción, bodega y baños), mientras que el componente de las celdas de combustible servirá como sistema de respaldo en lugar de utilizar un generador de diesel o gasolina y así el sistema será menos contaminante, la operación del sistema se propondrá que sea con interruptor de transferencia, ya que es el más común de acuerdo a la bibliografía.

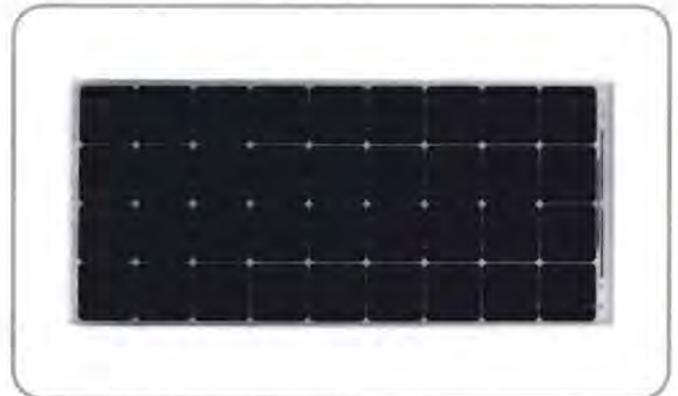
### 4.1 Características de los componentes del sistema híbrido

Los principales componentes para el sistema híbrido serán en la parte fotovoltaica, módulos de la marca Bp Solar modelo BP 485 (ver figura 4.1), la parte eólica estará conformada por un generador de la marca Southwest Windpower modelo AIR-X (ver figura 4.2), las celdas de combustible son de la marca Reli-On modelo I-1000 (ver figura 4.3) y el sistema de acondicionamiento y conversión de energía estará compuesto por un controlador de carga Xantrex modelo DR1512 y un inversor Xantrex modelo C40, respectivamente (ver figuras 4.4 y 4.5).

Los módulos fotovoltaicos propuestos son de silicio monocristalino de la marca Bp solar, cuyas especificaciones de placa se pueden ver en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Datos de placa del módulo BP 485.

CONCEPTO	VALOR
Potencia máxima ( $P_{max}$ )	85 W
Voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ )	22.0V
Corriente a corto circuito ( $I_{sc}$ )	5.4 A
Voltaje a potencia máxima ( $V_{P_{max}}$ )	17.8 V
Corriente a potencia máxima ( $I_{P_{max}}$ )	4.9 A



**Figura 4.1** Fotografía de un módulo fotovoltaico BP.

El generador eólico AIR-X, produce hasta 400 W y puede cargar baterías a 12 V, sus principales datos de fabricante se pueden ver en la tabla 4.2.

CONCEPTO	VALOR
Diámetro de rotor	1.4 m
Peso	6 kg
Velocidad del viento para arranque	3 m/s
Voltaje de salida	12 V
Potencia máxima	400 W



**Figura 4.2** Fotografía de un generador eólico AIR-X.

El sistema de celdas de combustible tiene un rendimiento de 1000 W continuos, y puede trabajar hasta 40,000 horas a máxima demanda. Opera con hidrógeno estándar industrial, sus principales datos se pueden ver en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Datos de placa del I-1000.

CONCEPTO	VALOR
Potencia máxima	1,000 W
Presión de trabajo	25 a 100 psi
Voltaje de salida	12 V
Rendimiento	40,000 hrs.
Emisión máxima de agua	30 ml/kWh
Consumo de hidrógeno	15 l/min @ 1000 W



**Figura 4.3** Fotografía de las celdas de combustible I-1000.

El sistema de acondicionamiento y conversión de energía estará compuesto por un controlador de carga Xantrex modelo DR1512 y un inversor Xantrex modelo C40, ambos operan a un voltaje de 12 V.



**Figura 4.4** Fotografía de un inversor Xantrex DR1512.



**Figura 4.5** Fotografía de un controlador Xantrex C-40.



### 4.2 Dimensionamiento del sistema híbrido

El sistema propuesto operará con un voltaje de 120 V en CA por lo cual se consideran nuevas cargas como lámparas ahorradoras, en la tabla 4.4 se pueden ver las especificaciones de cada carga así como también su régimen de uso. Se limita el uso de energía eléctrica sólo para iluminación y ventilación con base a la operación que maneja el hotel.

Tabla 4.4 Cuadro de cargas para la propuesta y consumo.

TIPO DE CARGA	Vn (V)	Pn (W)	Ic (A)	CANTIDAD	REGIMEN DE USO (h)	DEMANDA (W)	CONSUMO (W-h)
Lámpara fluorescente	120	15	0.12	29	3	435	1,305
Lámpara fluorescente	120	24	0.20	5	3	120	360
Ventilador	120	75	0.62	8	2	600	1,200
					<b>TOTAL</b>	<b>1,155</b>	<b>2,865</b>

#### 4.2.1 Cálculo de energía eólica

La estimación de la energía eléctrica producida por el generador eólico AIR-X se realizará utilizando la gráfica de energía producida en watts contra la velocidad instantánea del viento en la región (ver figura 4.6), para obtener la velocidad promedio anual en la localidad se utilizará el mapa de recurso eólico en la Península de Yucatán (ver figura 4.7) elaborado por Los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL por sus siglas en inglés).

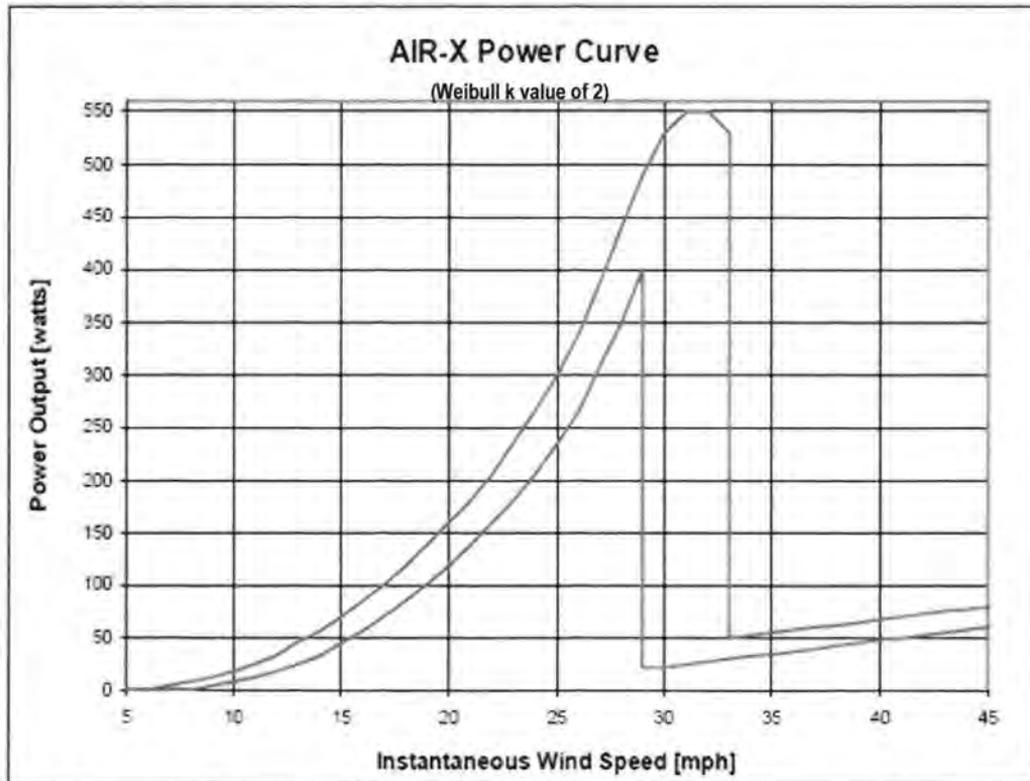


Figura 4.6 Gráfica de energía producida por el generador eólico contra velocidad instantánea del viento, donde la línea de arriba corresponde a flujo no turbulento y la línea de abajo a flujo turbulento.



### Mexico - Campeche, Quintana Roo and Yucatan Wind Resource Map

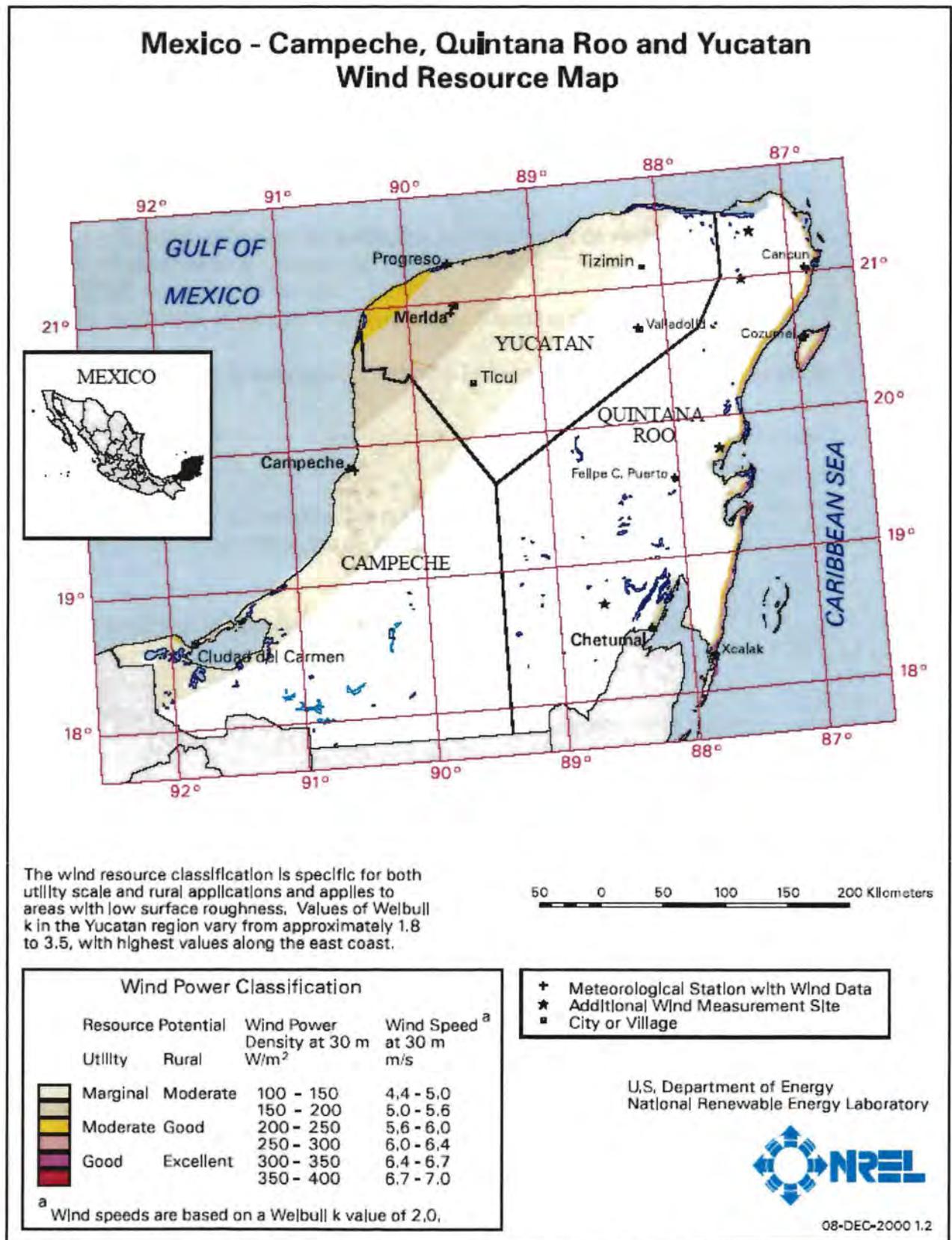


Figura 4.7 Mapa de recurso eólico en la Península de Yucatán.



Para determinar la energía anual producida por el aerogenerador se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$E_a = \sum_{i=v1}^{vn} (p_i)(f_i)(8760) \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

$E_a$  = Energía anual.

$p_i$  = Potencia instantánea de la máquina a una velocidad de viento "i".

$f_i$  = Frecuencia de la velocidad del viento "i" =  $F(V_i)$ .

(8760) = horas totales del año.

$i=v1$  = Valores de velocidad del viento desde 0 hasta el máximo registrado.

La frecuencia de la velocidad del viento  $f_i$  o  $F(V_i)$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$F(V_i) = \Delta V p(V_i) \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

$\Delta V$  = incremento de velocidad (en nuestro caso igual a 1).

$p(V_i)$  = función de distribución de Weibull.

La función de distribución de Weibull se calcula con la siguiente ecuación:

$$p(V_i) = \left[ \left( \frac{k}{c} \right) \left( \frac{V_i}{c} \right)^{k-1} \right] e^{-\left( \frac{V_i}{c} \right)^k} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

$V_i$  = Velocidad "i" del viento.

$k$  = factor de forma (adimensional)

$c$  = factor de escala

El factor de escala  $c$  se determina con la siguiente ecuación:

$$c = V/0.89 \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

$V$  = Velocidad media anual.

Sustituyendo un valor de velocidad media anual de 5.6 m/s (según figura 4.7), un factor de forma de 2 (de acuerdo a figura 4.6), un incremento de velocidad de 1 m/s, para velocidad de 0 m/s hasta 13 m/s en las ecuaciones 5,6,7 y 8 obtenemos los resultados para la tabla 4.5.



**Tabla 4.5:** Estimación de energía anual producida por un aerogenerador AIR-X en el sitio

$V_i$	$p_i$	$p(V_i)$	$F(V_i)$	Hrs. al año	$E_a$ (W-h)
0	0	0	0	8760	0
1	0	0.04960465	0.04960465	8760	0
2	0	0.09196475	0.09196475	8760	0
3	6.5	0.12157037	0.12157037	8760	6922.2168
4	18.4	0.1358087	0.1358087	8760	21890.1891
5	19.35	0.13522119	0.13522119	8760	22920.8025
6	43.22	0.12287942	0.12287942	8760	46523.0349
7	67.09	0.10321081	0.10321081	8760	60657.8577
8	90.96	0.0807351	0.0807351	8760	64330.4988
9	63.9	0.05910254	0.05910254	8760	33083.4753
10	119	0.04062571	0.04062571	8760	42349.8647
11	194	0.02628312	0.02628312	8760	44666.5926
12	259	0.01603227	0.01603227	8760	36374.6474
13	0	0.00923278	0.00923278	8760	0
	$\Sigma$	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	$\Sigma E_a$	<b>379719.18</b>

Para estimar la energía producida en un día, sólo se divide el resultado total entre 365, por lo que un aerogenerador produciría diariamente:

$$E_d = 1040.33 \text{ W-h}$$

De acuerdo con el consumo del hotel (tabla 4.4) y la energía producida por un aerogenerador ( $E_d$ ) se estima que el sistema podría estar conformado por 3 aerogeneradores.

#### 4.2.2 Cálculo de energía fotovoltaica

Para el cálculo del tamaño del arreglo fotovoltaico se utilizará la ecuación 3 y los datos de la tabla 4.4, otro dato importante en el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico es el de las horas pico; que se refieren a la cantidad de energía promedio captada por un metro cuadrado ( $\text{kWh/m}^2$ ) en un día. De acuerdo con el mapa de radiación solar anual de la figura 3.19 el sitio cuenta con un promedio anual de 4.5 a 5 horas para efectos de diseños del sistema fotovoltaico se tomará el margen con menor valor, es decir, 4.5 horas pico.

Sustituyendo los valores de horas pico y potencia máxima de módulo y un factor de 5% de sobredimensionamiento en la ecuación 3 se tiene que:

$$M = 11.50 \text{ módulos fotovoltaicos}$$

Por lo tanto el arreglo fotovoltaico estará conformado por 12 módulos fotovoltaicos de 85 W con un voltaje de operación igual a 12 V.



### 4.2.3 Cálculo del banco de baterías

Para el sistema de almacenamiento se pretende utilizar baterías de 100 amperes-hora de descarga profunda libres de mantenimiento y con un voltaje de operación de 12 V. Para determinar la capacidad de almacenamiento del banco de baterías se utiliza la ecuación 4, considerando dos días de autonomía del sistema y baterías de placa delgada se tiene que:

$$C_B = 909.52 \text{ A-h}$$

El sistema de almacenamiento entonces estará conformado por 10 baterías de 100 A-h con un voltaje nominal de 12 V. Las baterías a utilizar son de la marca Deka modelo Unigy I 12AVR100 (figura 4.9) y sus principales datos de placa se pueden ver en la tabla 4.5.



Figura 4.8 Fotografía de una batería Deka Unigy I 12AVR100.

Tabla 4.6 Datos de placa de la batería Unigy.

CONCEPTO	VALOR
Voltaje nominal	12 V
Rendimiento	100 A-h
Voltaje de carga	2.30 V
Volumen	12,272.25 cm <sup>3</sup>
Peso	32.6 kg

### 4.2.4 Cálculo de capacidad de hidrógeno

De acuerdo con la tabla 4.4 la demanda del hotel es igual a 1,155 W, y el consumo de hidrógeno de las celdas de combustible a su demanda máxima (1000 W) es de 15 l/min, con la siguiente ecuación se puede determinar el flujo de hidrógeno necesario para las celdas de combustible:

$$Q_H = \left[ \frac{(D_i)(Q_c)}{D_{mc}} \right] \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

$Q_H$  = Flujo de hidrógeno

$Q_c$  = Flujo demandado por las celdas de combustible a su máxima potencia

$D_{mc}$  = Potencia máxima de las celdas de combustible

$D_i$  = Demanda de potencia de la instalación

Sustituyendo los valores de la tabla 4.3 y 4.4 en la ecuación 9 tenemos que:

$$Q_H = 17.32 \text{ l/min}$$



## Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Se ha presentado un análisis energético de las instalaciones fotovoltaicas existentes en el hotel Villas Ecotucán, asimismo se realizó una propuesta de un sistema híbrido (fotovoltaico-eólico-celdas de combustible).

Del análisis realizado a los sistemas fotovoltaicos e instalación eléctrica del Hotel "Villas Ecotucán" se mencionan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

En el sistema fotovoltaico que opera para cargas en CA se observó que se encontraba trabajando en buenas condiciones en términos generales, sin embargo, se visualizaron ciertos defectos de instalación como son una mala ubicación del banco de baterías (*ver figura 3.20; capítulo 3*) al encontrarse en una bodega en la cual no se cuenta con una muy buena ventilación y el espacio es reducido, ya que se encuentra lleno de otros artículos que con alguna chispa pueden producir un incendio, otro defecto visual en ese sistema es el cableado que en el controlador de carga, inversor y tablero de distribución de cargas (*ver figuras 3.22, 3.24 y 3.5; capítulo 3*) por ello es difícil identificar los cables de cada uno de los componentes del sistema fotovoltaico, la orientación del arreglo no es muy buena ya que cuenta con una desviación al suroeste y también la inclinación de éste no es buena ya que se recomienda que de preferencia la inclinación debería ser al menos igual a la latitud del lugar en este caso no es la correcta.

Por todos los puntos expuestos en el párrafo anterior se proponen las siguientes recomendaciones: para que el sistema no sufra defectos en su operación y rendimiento: ubicar en un lugar más seguro y ventilado el banco de baterías, etiquetar los cables para poder identificar a que corresponden cada uno de ellos así como también darle una vista más estética a su disposición, corregir la orientación y la inclinación del arreglo fotovoltaico.

En lo que respecta al dimensionamiento del sistema para cargas en CA, se observa que se encuentra excedido en el número de módulos requeridos (ocho) ya que para el consumo registrado sólo son necesarios cinco módulos; asimismo el banco de baterías se encuentra formado por ocho baterías, cuando podría estar conformado por sólo cuatro.

En el sistema fotovoltaico que opera para cargas en CD que sirve de fuente de energía para las 5 cabañas (*ver figura 3.3; capítulo 3*), se encontraba trabajando bien, aunque presentó ciertos desperfectos en su instalación como son: el controlador de carga y el banco de baterías se encuentran expuestos a la intemperie (*ver figuras 3.8 y 3.9; capítulo 3*) donde las inclemencias del clima o insectos pueden ser factores que alteren a los equipos y eso conlleva a un mal funcionamiento del sistema fotovoltaico, el tablero de distribución y el registro eléctrico principal (*ver figuras 3.11 y 3.13; capítulo 3*) no cuentan con una clara identificación de los cables que alimentan a cada uno de los circuitos, también se observa que los interruptores que sirven como elementos de seguridad son para corriente alterna y el sistema no trabaja con este tipo de corriente, en tanto a la orientación del arreglo se pudo constatar que está bien dirigida (hacia el sur) aunque su inclinación no es la adecuada.

Para el sistema fotovoltaico para cargas en CD se recomiendan las siguientes medidas correctivas, que el banco de baterías y el controlador de carga sean reubicados a un lugar en donde se encuentren menos expuestos a la intemperie y cuenten con una buena ventilación, etiquetar los cables en el tablero de distribución y de preferencia utilizar interruptores para CD y corregir la inclinación del arreglo a la latitud del lugar.



El arreglo fotovoltaico para cargas en CD está reducido en la cantidad de módulos que necesita, ya que está conformado por 5 módulos cuando debería estar conformado por sólo 11 módulos; respecto a la capacidad de almacenamiento del banco de baterías, se puede mencionar que es adecuada al consumo que registran las cargas del sistema.

Respecto al dimensionamiento del sistema híbrido se optó por la propuesta fotovoltaica-eólica-celdas de combustible porque es una opción menos contaminante que un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel, ya que las celdas de combustible contaminan menos que un generador diesel aunque como todo sistema vanguardista su principal obstáculo siempre suele ser los costos iniciales, aunque analizando muy bien se puede observar que algunos de los sistemas que trabajan con energías renovables suelen tener una buena recuperación en su inversión ya que sus gastos de mantenimiento son pocos o casi nulos y que al tratarse de energías en cierto modo recientes, aún no se conocen con un gran exactitud su verdadero tiempo de vida útil.

Otra característica muy importante (aunque no es el objeto de estudio de este trabajo) es la de que este sistema no es el todo independiente ya que necesita combustible para el sistema de respaldo (hidrógeno) que en la región si se cuenta con proveedor de este gas (INFRA del Sur), aunque de acuerdo con la tecnología de las celdas de combustible se podría implementar un sistema de este tipo pero netamente independiente, en el cual las fuentes de energía solar fotovoltaica y energía eólica sirvieran como productores del hidrógeno mediante un dispositivo llamado electrocatalizador, y así satisfacer el requerimiento de hidrógeno para las celdas de combustible.

Una característica particular de la propuesta es que el sistema sólo serviría para suministrar energía para la iluminación y equipos de ventilación del establecimiento, ya que la política del hotel es usar al mínimo los aparatos eléctricos como TV, estéreo, DVD, u otros, ya que el concepto que el hotel vende es utilizar tecnología renovable para impulsar el ecoturismo en la región.

Como conclusión final puede mencionar que el estudio requirió de mucha investigación tanto bibliográfica como métodos de dimensionamiento en los sistemas híbridos ya que no existen muchos libros o medios científicos donde se planteen metodologías para este tipo de sistemas por lo cual puedo decir que este trabajo monográfico se encuentra rico en información para cualquier otro estudio en el que se involucre un sistema igual o parecido a la propuesta presentada en él.



## Recursos bibliográficos

1. Lorenzo, Eduardo. **"Solar electricity engineering of photovoltaic systems"**, PROGRENDA (Promotora General de Estudios S.A.), Sevilla, España, 1994, ISBN: 84-86505-55-0.
2. Markvart, Tomas. **"Solar electricity"**, John Wiley & Sons Ltd, segunda edición, West Sussex, England, 1994, ISBN: 047198859.
3. Lasnier, France y Tony Gan Ang. **"Solar electricity"**, Bristol, New Cork, 1990, ISBN: 0-85274-311-4.
4. Duffie, John A. y William A. Beckman. **"Solar engineering of thermal process"**, John Wiley & Sons, Segunda edición, U.S.A. 1991, ISBN: 0-471-51056-4.
5. González Galarza, Raúl y Ricardo Saldaña Flores. Notas del Curso: **"Energía eólica y sus aplicaciones en México"**, ANES 2002, Chetumal, Quintana Roo, México.
6. Sánchez Juárez, Aarón. Notas del curso: **"Tecnología fotovoltaica aplicada al bombeo de agua"**, FIRCO-UQROO, Chetumal, Quintana Roo, México.
7. Sánchez Juárez, Aarón. Notas del curso: **"Sistemas fotovoltaicos y sus aplicaciones en el medio rural"**, CIE-UQROO, Chetumal, Quintana Roo, México. 2003
8. Arriaga Hurtado, Luis Gerardo. Notas del curso: **"Perspectivas y aplicaciones del hidrógeno como combustible"**, IIE-UQROO-CONACYT, Chetumal, Quintana Roo, México. 2004
9. W. Shepperd, Lisa. **"Energía fotovoltaica para proyectos de desarrollo"**, Sandia Nacional Laboratorios, Albuquerque, New Mexico, EU, 1994.
10. Soler Bientz, Rolando. **"Diseño y desarrollo de un sistema para el estudio del potencial solar y eólico en la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán"**, Revista solar # 48, ANES, México, 2003.
11. Manrique, Jose A. **"Energía solar fundamentos y aplicaciones fotovoltaicas"**, HARLA, México, 1984, ISBN: 968-603454-4
12. **"El curso taller internacional en sistemas híbridos solar-eólico para la generación de electricidad"**, Red Iberoamericana de electrificación Rural e Instituto de Investigaciones Eléctricas, del 13 al 16 de noviembre de 2001, San Miguel Regla, Hidalgo, México.
13. <http://www.re.sandia.gov/splin-fs.htm>
14. <http://www.ambiente-ecológico.com>
15. <http://www.construtips.com/celdas.html>
16. <http://genc.iie.org.mx/genc/celdas/frames.asp?mcontador=8885&url=presentacion%2Ehtm>
17. <http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=606>
18. <http://genc.iie.org.mx/genc/fotovoltaico/frames.asp?mcontador=8886&url=imagenes%2Ehtm>
19. <http://genc.iie.org.mx/genc/eolica/frames.asp?mcontador=8886&url=presentacion%2Ehtm>
20. <http://genc.iie.org.mx/genc/hibridos/frames.asp?mcontador=8886&url=proyectos%2Ehtm>
21. <http://www.fuelcelltoday.com/index/>
22. <http://www.bpsolar.com>
23. [http://www.relion-inc.com/products\\_ind1000.asp](http://www.relion-inc.com/products_ind1000.asp)