

ENERGÍA RENOVABLE EN  
EL SIGLO XXI

**Jorge Gutiérrez Vera**



ENERGÍA RENOVABLE EN  
EL SIGLO XXI

**Jorge Gutiérrez Vera**

**SENADO DE LA REPÚBLICA**

---

Primera edición, diciembre de 2001  
© 2001 Senado de la República

Impreso y hecho en Monterrey, México  
*Printed and made in Monterrey, México*

# INDICE

I. Introducción	1
II. Antecedentes	4
1. Energía Fotovoltaica	14
1.1 Principio de operación	14
1.2 Sistemas fotovoltaicos aislados	16
1.3 Sistemas híbridos	16
1.3.1 Criterios de diseño	16
1.3.2 Metodología de estudio	21
1.3.3 Resumen de cargas	22
1.3.4 Curva de duración de carga	22
1.3.5 Corriente directa vs Corriente alterna	23
1.3.6 Principio de operación del sistema	23
1.3.7 Dimensionamiento del sistema	24
1.3.8 Especificaciones de diseño	25
1.3.9 Descripción del sistema	27
1.3.10 Organización comunitaria	30
1.3.11 Resumen del sistema	31
1.3.12 Operación y mantenimiento	31
1.3.13 Análisis de costos	35
1.3.14 Otros sistemas híbridos	36
1.4. Otras tecnologías para alimentación de cargas remotas	36
1.4.1 Tecnologías no viables	36
1.4.1.1 Celdas de combustibles	36
1.4.1.2 Biomasa	36
1.4.1.3 Dendotermicas	37
1.4.1.4 Microhidroelectricidad	37
1.4.1.5 Termosolares	37
1.5. Tecnologías viables	37
1.5.1 Generación a diesel con equipo centralizado	37

1.5.2	Extensión de la red eléctrica de la suministradora	39
1.5.3	Resumen de costos unitarios	41
2.	Energía Termosolar	41
2.1	Energía solar pasiva	43
2.2	Energía solar activa de baja temperatura	44
2.3	Energía solar de media temperatura	50
2.4	Energía solar de alta temperatura	52
3.	Energía eólica	54
3.1	Potencial eólico en México	55
3.2	Energía eólica en el mundo	57
3.3	Datos básicos para el calculo de generación eólica	58
3.4	Influencia de obstáculos topográficos	59
3.5	Criterios de diseño	61
3.6	Generadores eólicos	62
4.	Microhidroelectricidad	68
4.1	Tipos de mini centrales	69
4.2	Criterios de diseño	71
4.3	Datos necesarios para el calculo de instalaciones	72
4.4	Potencia instantánea	72
4.5	Turbinas hidráulicas	73
4.6	Pequeñas centrales en el acueducto México-Lerma	75
4.7	Acueducto Tijuana-Mexicali	
5.	Biomasa	81
5.1	Incineración directa	81
5.2	Rellenos sanitarios	82
5.3	Composición de la basura en México	82
5.4	Principios de descomposición de la basura	83
5.5	Componentes del biogas en México	83
5.6	Sistemas de recuperación de biogas	84
5.7	Formación de lixiviados	85
5.8	Control de biogas y lixiviados	85
5.9	Relleno sanitario Prados de la Montaña	85
6.	Sistemas de almacenamiento de energía de muy baja temperatura en campos magnéticos de grandes inductores	89
7.	Microesquemas de cogeneración	96
7.1	Descripción de las micro turbinas de gas	97
8.	Conclusiones	99

# INTRODUCCIÓN

El objeto del presente trabajo es llamar la atención sobre la problemática mundial respecto de las fuentes energéticas convencionales. Si bien en el momento de escribir este capítulo los precios del petróleo a nivel mundial han sufrido reducciones de consideración, debido fundamentalmente a la sobre oferta de este energético, esta situación es coyuntural y en el mediano y largo plazo el precio del petróleo y sus derivados tendrán que sufrir incrementos significativos, sobre todo en la medida en que se vayan agotando las reservas comprobadas.

Es importante destacar que las más recientes exploraciones han puesto de manifiesto la creciente dificultad para la extracción del petróleo debido a las profundidades a las que se están encontrando los mantos de este hidrocarburo. Lo anterior necesariamente lleva implícito el hecho de que la tendencia natural en lo que se refiere al precio del petróleo tendrá que ser a la alza.

En adición a lo anterior, las restricciones ambientales en todo el mundo harán cada día más difícil el uso de combustibles fósiles para la satisfacción de las cada vez crecientes necesidades energéticas de la población mundial. La gran interrogante es si la tecnología del siglo *xxi* será capaz de sustituir el petróleo y sus derivados como fuente energética de la humanidad.

Los actuales avances en materia de investigación y desarrollo respecto de las fuentes renovables de energía están muy lejos de garantizar la oferta energética mundial de la presente centuria.

Para México, los sustitutos naturales del petróleo para generación de electricidad, considerando los niveles de demanda de potencia en MW y de

consumo de energía en MWH, pueden ser: La hidroelectricidad, la geotermia y la energía nuclear.

En un análisis geográfico de la República es fácil darse cuenta que el mapa de México, a diferencia del de Canadá, es más café que azul, lo cual indica que nuestros recursos hidroeléctricos son muy limitados y que los aprovechamientos más importantes se encuentran funcionando desde varios años.

Por lo que se refiere a la geotermia, también se puede mencionar que con las centrales instaladas en los estados de Baja California, Michoacán y Puebla, prácticamente se tienen cubiertos los recursos geotérmicos más importantes del país.

En el caso de la energía nuclear, el potencial eléctrico disponible incluyendo el aprovechamiento de la roca fosfórica de la Península de Baja California, es suficiente solamente para una nueva central de la misma capacidad de Laguna Verde, ello sin tomar en cuenta los problemas derivados del costo por kW instalado en este tipo de centrales y el costo del manejo de los desechos radioactivos durante muchos años.

Una pregunta obligada sería: ¿Qué otras alternativas tiene la humanidad para la satisfacción de sus necesidades energéticas en el siglo xxi? La respuesta es: Las fuentes renovables de energía, entre las que podemos citar:

- La energía solar fotovoltaica y térmica
- La energía eólica
- La biomasa
- La micro hidroelectricidad
- Las estaciones de rebombeo
- El almacenamiento de energía en los campos magnéticos de bobinas
- Las celdas de combustible
- La energía mareomotriz

En el presente documento se hará un análisis de las alternativas más viables y, como se verá más adelante, se puede afirmar *a priori* que actualmente ninguna de las alternativas mencionadas puede sustituir, el petróleo como fuente energética, principalmente porque las cantidades de energía



generada con este tipo de fuentes renovables son de hecho irrelevantes en lo que a magnitud se refiere. Sin embargo, no se puede soslayar que México se encuentra dentro de la franja de máxima radiación solar, tal como se muestra en la Figura A, ni los importantes recursos eólicos y geotérmicos con que cuenta el país.

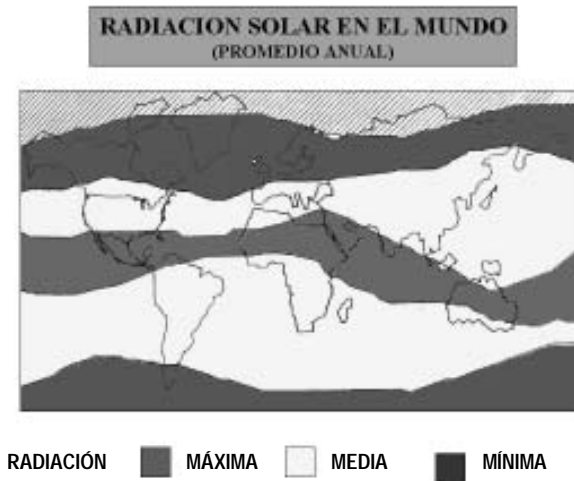


Figura A

El Dr. Paul Maycok, un profundo conocedor de la energía solar, en su libro *A Guide to the Photovoltaic Revolution* apunta que en el siglo XXI será factible tener en el espacio exterior, a 36,000 Kilómetros de la superficie terrestre, dos paneles solares de 4 Km. por lado (32 Km<sup>2</sup>), unidos por una viga en la que a una distancia igual a cada panel se instale una antena de un kilómetro de diámetro para enviar por micro ondas a la superficie terrestre a un punto determinado a una antena receptora de 7 Km. De diámetro, importantes cantidades de energía. Con este sistema es factible obtener hasta 10 GW, por lo que para el caso de México, cuatro de estas instalaciones serían capaces de soportar la demanda de potencia y el consumo de energía.

Evidentemente el costo inicial de este tipo de instalaciones, así como los costos derivados de la operación, mantenimiento y seguridad de las mismas, no las hacen viables desde el punto de vista económico y tal vez esta

situación cambie cuando el precio del barril de petróleo sea de los 300.00 dólares norteamericanos.

Lo anterior pone de manifiesto el serio problema que tendrán que resolver los ingenieros, físicos y técnicos del siglo *xxi*, para satisfacer de las necesidades energéticas de la humanidad. Se puede anticipar que no será una tarea fácil, pues además de los problemas técnicos implícitos en el desarrollo de las fuentes energéticas que sustituirán al petróleo, habrá que agregar una gran cantidad de intereses económicos creados por las grandes compañías petroleras del mundo.

Este escenario es sinceramente preocupante, toda vez que acciones que pueden diferir en el tiempo esta problemática, como la aplicación obligatoria de programas de ahorro y conservación de la energía, el fomento de uso de fuentes de energía renovable en sustitución de combustibles fósiles a través de incentivos fiscales, créditos blandos, así como leyes, normas y reglamentos pensadas para este propósito, se han venido soslayando por parte de las autoridades responsables, todo ello a pesar de que se ha demostrado en múltiples ocasiones que el costo del kW ahorrado es menor que el costo del nuevo kW instalado.

El presente trabajo es un resumen de investigaciones llevadas a cabo sobre este tema en los últimos 20 años, para buscar alternativas de solución al problema de energéticos que necesariamente vivirán las generaciones del siglo *xxi*, y el principal objetivo del mismo es despertar la conciencia de investigadores, ingenieros, académicos, autoridades y científicos de todo el mundo, pero principalmente de México, sobre la magnitud del problema, para que en una acción coordinada se busquen alternativas viables de solución.

# ANTECEDENTES

En la actualidad, un importante segmento de la población mundial tiene posibilidades de disfrutar los beneficios derivados de avances tecnológicos de toda índole y este segmento es cada día más grande y demandante de energéticos, tanto primarios como secundarios; como consecuencia de lo anterior, se incrementa en forma constante el uso de combustibles fósiles fundamentalmente para la propulsión de vehículos automotores así como para la generación de energía eléctrica y marginalmente para la industria petroquímica.

El uso indiscriminado de combustibles fósiles incrementa en forma sensible la emisión de contaminantes a la atmósfera en forma de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono y partículas suspendidas.

Los gases de efecto invernadero originados por la incineración de combustibles fósiles han causados cambios climáticos impredecibles que se representan en forma de ciclones, huracanes, tempestades, lluvias torrenciales, etc. Además, se ha comprobado un sobrecalentamiento de la tierra que tiende a derretir parte de los casquetes polares con el riesgo de que algunas áreas costeras del planeta se pierdan. Lo anterior ha llegado a un extremo tal que las compañías aseguradoras en Estados Unidos de Norteamérica atribuyen a los cambios climáticos debidos a la contaminación el incremento súbito en los pagos por siniestros, que en 1995 alcanzaron los 180 billones de dólares.

En virtud de lo anterior y con objeto de proteger su negocio central han decidido tomar parte activa en la solución del problema a través del financiamiento de una industria de energía solar de carácter mundial, sin

embargo, hasta la fecha poco se sabe de los resultados obtenidos sobre el particular.

Los efectos de la contaminación del agua y el aire inciden sobre el suelo en que cultivamos nuestros alimentos, la lluvia ácida destruye los bosques y contamina los acuíferos, dañando además la flora y la fauna marina. En el ser humano los efectos adversos de la contaminación pueden ir desde una simple conjuntivitis hasta un cáncer.

En la República Mexicana más del 70% de la energía eléctrica producida por Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro proviene de combustibles fósiles, entre los que destacan el Combustóleo, el carbón, el diesel y el gas natural. Uno de los principales proyectos gubernamentales contenidos en el Plan de Desarrollo Energético 1995-2000 pretende reducir paulatinamente la dependencia de los hidrocarburos en la generación de energía eléctrica, que actualmente es del 70.7% en términos de energía generada, y se espera sea de 49% en el año 2005.

En la actualidad, las tarifas eléctricas están basadas en función de la canasta de combustibles establecida en 1992. Esta canasta no representa la realidad en los consumos de combustibles actuales usados por CFE para producir energía eléctrica, toda vez que los nuevos ciclos combinados desarrollados y en proceso de construcción dentro del programa de *productores externos de energía*, darán como resultado una mayor proporción en la participación del gas natural para la producción, como se muestra en la siguiente tabla contenida en la *Prospectiva del Sector eléctrico 2000-2009*.

Evolución del consumo de combustibles fósiles  
para la generación bruta de energía eléctrica  
1999 Total: 3,713 Tera Joules por día  
2009 Total: 6,499 Tera Joules por día

<b>CANASTA DE COMBUSTIBLES DE CFE</b>		
<b>Combustible</b>	<b>1999 (%)</b>	<b>2009 (%)</b>
Gas Natural	20	62
Carbón	13.2	14.1
Diesel	1.3	0.3
Combustoleo	65.5	23.6

En otro orden de ideas, los carburos de hidrógeno son recursos naturales no renovables y se estima que las reservas probadas mundialmente satisfarán las necesidades energéticas de la población mundial durante los próximos 60 años.

Lo antes expuesto significa que en la segunda mitad del siglo *xxi*, las actuales fuentes energéticas serán insuficientes para cubrir las crecientes necesidades de una población consumidora intensiva de combustóleo, diesel, gasolina, gas natural y electricidad, por lo que los precios aumentarán en forma considerable, quizá 3 o 4 veces más en relación con los actuales en términos reales.

Es de esperarse que en algunos países latinoamericanos, asiáticos y de Europa oriental, cuya economía es altamente dependiente del petróleo, al agotarse éste confronten serios problemas de desempleo, pobreza, delincuencia, hambruna y que eventualmente, tales conflictos degeneren en guerras civiles o revoluciones o, en el último de los casos, sirvan de pretexto para dicho propósito.

En vista de lo anterior, el papel que en el muy corto plazo deberán desempeñar los programas de ahorro, conservación y uso eficiente de energéticos, así como el desarrollo de las fuentes de energía renovable será de vital importancia para el sano desarrollo de la humanidad.

Es de particular importancia destacar que en México existen cerca de 80,000 pequeñas comunidades rurales de menos de 1,000 habitantes que carecen de energía eléctrica.

El Sector Eléctrico Mexicano (Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro) ha electrificado en los últimos 40 años 30,000 comunidades rurales mediante sistemas tradicionales de distribución de energía eléctrica, consistentes en líneas y redes de distribución. Sin embargo, este gran esfuerzo no ha sido suficiente ya que en las 80,000 comunidades antes mencionadas que aún carecen del fluido eléctrico, habitan cerca de seis millones de mexicanos. Estos pequeños poblados se localizan en las partes altas de las serranías, sus vías de acceso en la mayoría de los casos no permiten la entrada de vehículos automotores y además la ubicación geográfica de las casas dentro de la población es sumamente dispersa, lo cual dificulta y encarece las redes de distribución de energía eléctrica convencionales.

En virtud de lo antes dicho, fue necesario desarrollar modelos autónomos e independientes para proporcionar energía eléctrica a las comunidades rurales antes mencionadas, para lo cual se llevó a cabo una intensa labor de investigación sobre las tecnologías más adecuadas para la solución del problema.

La filosofía y estrategia de los programas de electrificación rural en México se basa en los siguientes aspectos:

- Dar a los habitantes de las comunidades rurales una mejor forma de vida, ya que con electricidad podrán tener acceso a otros importantes satisfactores, como agua potable, entretenimiento, educación, comunicación y seguridad social.
- Evitar la migración de los campesinos a las grandes ciudades ya que por su escasa preparación no podrán acceder al mercado de trabajo y se verán obligados a formar cinturones de pobreza en los principales núcleos urbanos del país; se establecerán en terrenos que no les pertenecen, creando problemas sociopolíticos a las autoridades y pasarán a formar parte de quienes se encuentran subempleados o en la economía informal.
- Con energía eléctrica en sus domicilios, los campesinos podrán trabajar, estudiar o divertirse durante las horas de la noche.
- Con los satisfactores que se desprenden de la energía eléctrica los campesinos podrán ser arraigados en sus comunidades y se podrán dedicar al cultivo de granos y vegetales para autoconsumo y para vender a otras personas de la misma comunidad o de otras cercanas.
- Se podrán iniciar pequeños talleres artesanales con máquinas de coser eléctricas, molinos de alimento para ganado, alimentación a pequeños motores para bombeo de aguas superficiales, invernaderos para cultivo de flor, etc., lo cual indudablemente reactivará la economía de la comunidad.

Es de mencionarse que la estructura de la tarifa eléctrica aplicada por las empresas eléctricas en México, para fines residenciales, es altamente subsidiada para consumos inferiores a 50 kWh mensuales, que es el caso de los habitantes de las comunidades rurales mencionadas; dado lo ante-

rior, para Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro resultaría menos oneroso regalar la energía eléctrica a los habitantes de estas comunidades que emitir una factura de muy bajo valor que obligaría a las empresas citadas a incurrir en los gastos implícitos en el proceso comercial, como lectura de los wathhorímetros, facturación, reparto de facturas, cobranza, corte y reconexión.

Además, el simple hecho de instalar un wathhorímetro en el domicilio de un campesino equivale a hacerlo sujeto de crédito, sin que necesariamente lo sea, ello aunado a la falta de preparación para usar racionalmente la energía eléctrica, ocasionan consumos elevados que dan origen a facturas que los campesinos no podrán pagar, con los consecuentes problemas sociopolíticos que estos hechos representan. Son comunes los casos en que algunos campesinos calientan tortillas mediante planchas eléctricas o *incuban* pollos con el calor de lámparas incandescentes de 100 watts, con los resultados antes mencionados.

La alimentación eléctrica de comunidades rurales aisladas no es la única aplicación de las fuentes renovables de energía; se pueden usar también para repetidoras de radio, televisión y micro ondas, en equipos de señalización de carreteras y vías férreas, en sistemas de protección catódica en tuberías subterráneas y torres de líneas de transmisión, en sistemas de adquisición de datos en plataformas marinas, etc. Es evidente que el uso de fuentes renovables de energía, además de no emitir contaminantes a la atmósfera, no presiona las reservas de hidrocarburos del país.

Los programas de administración de la demanda de potencia eléctrica (kW) y consumo de energía (kWh), llevados a cabo en industrias, comercios, edificios de oficinas, así como en condominios horizontales y verticales, mediante el uso de controladores lógicos programables (PLC's) con su programación correspondiente (software), son importantes nichos de ahorro de energéticos en el país.

**LA COGENERACIÓN** es sin lugar a dudas la forma de producción de electricidad que mayores beneficios representa para el país, en lo que a costo, uso racional de energéticos y aspectos medio ambientales se refiere. En alguna medida los ciclos combinados usados en los esquemas de producción externa antes mencionados representan una variante de la cogeneración.

El artículo 103 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de energía eléctrica establece, en términos de la fracción II del artículo 36 de dicha ley, que por cogeneración se entiende:

La producción de energía eléctrica conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria, o ambas;

La producción directa o indirecta de energía eléctrica a partir de energía térmica no aprovechada en los procesos de que se trate; o

La producción directa o indirecta de energía eléctrica utilizando combustibles producidos en los procesos de que se trate.

En México, con un potencial de cogeneración del orden de los 14,000 MW, de acuerdo con los estudios de la Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía (CONAE), no ha sido posible desarrollar (salvo verdaderas excepciones) esquemas de cogeneración, a pesar de que desde la modificación de la ley de la materia, dada en diciembre de 1992, se enfatiza la figura de autoabastecedores y cogeneradores y se crean las figuras de productores externos, pequeños productores, importadores y exportadores.

Es de mencionarse, sin embargo, que varios artículos del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica inhiben el desarrollo de los proyectos de cogeneración, entre estos podemos citar:

Al artículo 74, que establece que para la prestación del servicio público de energía eléctrica se aprovechará, tanto en el corto como en el largo plazo, la energía eléctrica que resulte de menor costo para la Comisión Federal de Electricidad y que ofrezca óptima estabilidad, calidad y seguridad del servicio público. En este caso, los costos de CFE para hacer llegar la energía a los usuarios no son del dominio público, por lo que no existe la posibilidad de establecer las comparaciones correspondientes. Sin embargo, es de inferirse que si se comparan los costos en que incurre CFE en la gran mayoría de sus centrales eléctricas en ciclo simple, más los costos de transmisión, transformación, distribución y comercialización con los costos de cogeneradores y esquemas de ciclo combinado, estos últimos seguramente resultarán inferiores a los de CFE.

El artículo 76 del Reglamento establece que para que los costos de energía eléctrica proveniente de plantas de CFE y los de los permisionarios que le aporten o pretendan aportar sean comparables, se estará a la metodolo-



gía que emita la Secretaría de Energía. La metodología de referencia está basada en costos marginales de combustible, lo que hace incosteable la venta de excedentes de potencia y energía a CFE o LFC. Es de mencionarse que, en términos generales, los permisionarios no fundamentan sus ingresos en las ventas de potencia y energía a las referidas instituciones y la oferta de dichos excedentes al Sector Eléctrico obedece, en términos generales, a la necesidad de lograr un mejor consumo unitario de combustible (Heat Rate) y, por consecuencia consumir menores cantidades de combustible, así como reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Por lo que se refiere al artículo 124 del Reglamento, además de reiterar lo que estipulan los artículos 74 y 76, menciona que las adiciones y sustituciones de la capacidad de generación deben ser una resultante de la prospectiva del Sector Eléctrico. Sin embargo, los esquemas de cogeneración y autoabastecimientos proyectados, no necesariamente coincidirán en lo que a ubicación se refiere con el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico.

La nueva redacción del artículo 135 del Reglamento, publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, en mayo del 2001, de la que dicho sea de paso existe interpuesta una controversia constitucional, permitirá a los permisionarios (de resolverse favorablemente para el Ejecutivo) entregar a CFE o LFC potencias excedentes superiores a los 20 MW en el caso de los autoabastecedores y cualquier cantidad excedente a los cogeneradores. Sin embargo, vale la pena citar que los límites previstos en la redacción anterior a mayo de 2001 nunca representaron obstáculo para el desarrollo de esquemas de cogeneración en México.

En otro orden de ideas, en los proyectos de cogeneración y autoabastecimiento, la selección de las turbinas de gas y de vapor y/o motores reciprocantes, toman en cuenta las necesidades de potencia y energía eléctrica y en su caso la demanda térmica, esto es, vapor, agua caliente, gases calientes, refrigeración, agua helada, etc., así como las expectativas de crecimiento de dichas necesidades.

Lo anterior implica que los tamaños de los equipos antes mencionados pudieran durante algún tiempo estar sobredimensionados. Por otra parte, en el remoto caso de que la unidad seleccionada pudiera ser del tamaño exacto para satisfacer solo el 100% de las cargas eléctricas y térmicas, el

factor de carga de los usuarios que siempre será inferior al 100% representará excedentes de energía susceptibles de entregarse a CFE o LFC, que son sin lugar a dudas el resumidero natural para esta energía (kWh) en su calidad de no notificada.

Lo expuesto hasta aquí implica que, de acuerdo en la legislación, vigente estos excedentes de potencia y energía solamente podrán ser vendidos a CFE o LFC fuera de concurso, siempre y cuando sean entregados en aquellas áreas en las que, de acuerdo con la prospectiva del sector eléctrico existan proyectos de ampliación de la capacidad instalada para la prestación del servicio público y que, además, sea la oferta más baja para el Sector Eléctrico en el largo plazo.

Sin duda, lo antes citado representa un alto grado de dificultad para los proyectos de cogeneración en México.

Las ventajas indiscutibles de los proyectos de cogeneración *versus* las centrales de ciclo abierto de CFE o LFC son, entre otras:

- 1.- Representan un uso más racional de un recurso natural no renovable como lo es el gas natural.
- 2.- Las emisiones de contaminantes a la atmósfera se reducen pues con el mismo combustible se genera electricidad, vapor, agua caliente, agua helada, refrigeración, étera.
- 3.- Una tercera parte de la energía comercializada por el Sector Eléctrico es consumida por cerca de 100,000 usuarios industriales contratados en tarifa de media tensión (HM) a tensiones de 13.8, 23 y 34.5 KV a través de alimentadores de distribución aéreos y por consecuencia expuestos a una gran cantidad de fallas externas, entre las que se pueden citar: Ramas de árbol, choques, vandalismo, lluvia, granizo, objetos extraños sobre las líneas, etc. Estas fallas temporales (menores a un segundo, pero muy frecuentes) afectan sensiblemente los estándares de calidad de producción de los usuarios, poniéndolos en franca desventaja respecto de sus competidores internacionales. Es por ello que los esquemas de cogeneración y autoabastecimiento representan una sensible mejora en la calidad y continuidad del servicio eléctrico para este tipo de usuarios.

4.- Los esquemas de cogeneración y autoabastecimiento sincronizados con las redes eléctricas de CFE o de LFC representan ingresos adicionales para el sector por concepto de venta de respaldo eléctrico, y de servicios conexos. (Arranque negro, control de frecuencia y de voltaje y reserva caliente)

5.- Al estar sincronizadas a las redes eléctricas del sector, las unidades de cogeneradores y autoabastecedores representaran un soporte de voltaje que mejorará la calidad del suministro eléctrico de CFE a otros clientes y en algunos casos evitará o por lo menos diferirá inversiones de CFE en equipos de regulación de voltaje, bancos de capacitores y compensadores estáticos y dinámicos de potencia reactiva.

Los esquemas de cogeneración, en la mayoría de los países desarrollados, generalmente reciben un fuerte impulso de sus gobiernos para su desarrollo, por las evidentes ventajas que representan para el país, por lo que es de extrañarse que en México no se encuentren los mecanismos necesarios para eliminar las barreras legales que inhiben la creación de esquemas de cogeneración, asunto que necesariamente tendría en el congreso de la Unión el mejor foro para su discusión.

Para lograr lo anterior, es necesario buscar fórmulas sencillas que privilegien la cogeneración partiendo de la base que esta, al tener eficiencias mayores a las de las centrales eléctricas de CFE, representan una optimización en el uso de los recursos naturales no renovables del país, así como una reducción de la emisión de contaminantes a la atmósfera. Un mecanismo simple para determinar el precio al cual puede comprar el Sector Eléctrico la potencia y energía excedente de los permisionarios puede ser fijar un porcentaje del orden del 80 al 90 % de los precios de la tarifa correspondiente, de acuerdo al nivel de tensión al cual sean sincronizadas las unidades eléctricas de los cogeneradores a las redes de CFE o de LFC.



# 1. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

## 1.1. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El proceso por el cual la luz solar o la artificial es convertida silenciosa y directamente en electricidad, sin la compleja maquinaria que normalmente se asocia con este proceso, se conoce como *fenómeno fotovoltaico*. La descripción del proceso fotovoltaico que se mencionará a continuación ayudará a entender por qué la energía solar es una fuente energética segura, limpia, permanente, confiable, ilimitada y cada día más atractiva desde el punto de vista social y económico.

Se puede decir que la luz está formada por pequeños *racimos* de energía los cuales actúan como proyectiles individuales. Estos racimos tienen masa y viajan a velocidades extremadamente altas, pero aún finitas y por consecuencia susceptibles de ser medidas. Cada proyectil es llamado *fotón* y la energía que posee es el producto de su masa por su velocidad, tal como sucede en el proyectil de un arma de fuego.

Una corriente de fotones o un rayo de luz se comporta como una cadena de ondas y por mucho tiempo se pensó que la luz era una clase especial de movimiento ondular en un medio hipotético y misterioso llamado *éter*:

Hace más de 100 años, en 1839 el científico francés Becquerel descubrió que cuando la luz incidía sobre un lado de una sencilla celda era factible hacer circular una corriente eléctrica por un conductor. Durante muchos

años nadie supo explicar el origen de la corriente, y no fue sino hasta muchos años después que se descubrió que un átomo consiste en un diminuto núcleo rodeado de electrones.

Cuando un fotón incide sobre un átomo, puede interactuar con los electrones al ser absorbido y la energía adicional al átomo provoca el desprendimiento de un electrón exterior. El electrón liberado en esta forma, de hecho, representa una corriente eléctrica. El silicio es el material que mejores características presenta para la transformación de la energía solar en energía eléctrica. En la Figura 1 se muestra un cristal de silicio en el que los átomos (círculos) se alinean en forma de tetraedro. Cada átomo tiene cuatro electrones (puntos negros), los cuales son compartidos por átomos vecinos para dar una estructura estable. En dicha figura se aprecia una partícula de luz (fotón) desprendiendo un electrón.

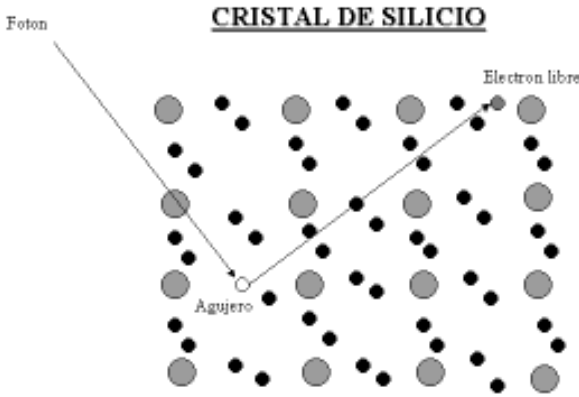


Figura 1

Cuando se trata de aprovechar la energía solar a través de dispositivos fotovoltaicos es importante tomar en cuenta dos aspectos respecto de la luz solar; el primero, ¿cuántos fotones llegan a un punto determinado sobre la superficie de la tierra? Y el segundo, ¿cuánta energía representan?

Ya se ha mencionado que la luz solar asemeja una corriente de proyectiles viajando a la misma velocidad, cuya energía es el producto de su masa por su velocidad. Se ha comprobado mediante ensayos de laboratorio que por encima de la atmósfera terrestre la energía de la luz solar es aproximadamente

de 1,358 watts por metro cuadrado y que al nivel del mar esta energía se reduce debido a la atenuación atmosférica a 930 watts por metro cuadrado.

Lo antes mencionado aplica para un día soleado, sin nubosidades y con el sol en el cenit. Como esta condición no es permanente a lo largo de las 24 horas del día, no es posible convertir ni siquiera la mitad de la energía solar en energía eléctrica, sin embargo, la energía total recibida es lo suficientemente grande para que en la actualidad el aprovechamiento de la energía solar en muchos casos, sea la alternativa de solución más adecuada tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El silicio, como se dijo es el material más frecuentemente usado en la fabricación de las celdas fotovoltaicas, fundamentalmente por ser muy abundante en la naturaleza y, por tanto de bajo costo. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento del silicio derretido se puede obtener monocristalino, policristalino o amorfo. Sus eficiencias, precio y características de operación difieren ligeramente y los dos primeros se usan en la fabricación de celdas solares en forma indistinta; el silicio amorfo, a pesar de ser más barato, tiene una eficiencia que varía entre el 9 y el 11%, mientras que en el monocristalino esta es de 16 a 18%; además, las características del silicio amorfo se degradan durante la vida útil de las celdas.

En la tabla siguiente se señalan algunos de los semiconductores que teóricamente prometen mayores eficiencias en la transformación de energía solar en energía eléctrica.

<b>Material</b>	<b>% Eficiencia máxima</b>
Germanio	13
Sulfato de cadmio	18
Silicio	25
Telurio de cadmio	25
Fosfato de indio	26
Arseniuro de galio	27
Aluminio-Antimonio	27

En la Figura 2 se muestra un diagrama esquemático de una celda solar de silicio monocristalino sobre la que incide un rayo de sol y libera un flujo de electrones que representan una corriente eléctrica capaz de encender una lámpara o accionar cualquier otro electrodoméstico.

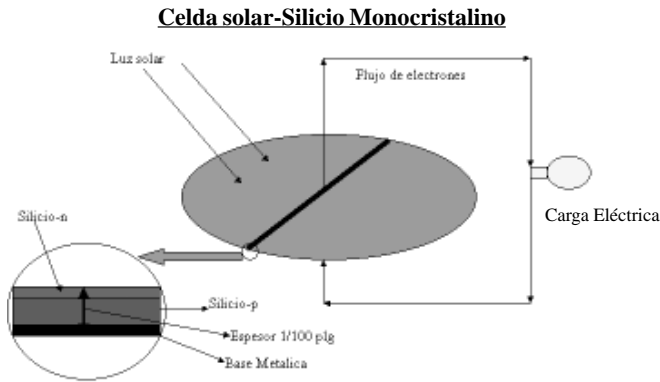


Figura 2

## 1.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS

En México esta es la aplicación más común de la energía solar, se usa para la alimentación eléctrica a pequeñas cargas aisladas e individualmente consideradas. Comisión Federal de Electricidad ha instalado cerca de 60,000 sistemas de este tipo en todo el territorio nacional y constan de:

- Un panel solar de 70 watts, 4.2 amperes, de silicio policristalino, orientado hacia el sur con un ángulo de inclinación de 15 grados.
- Una batería plomo ácido tipo industrial de descarga profunda de 200 A-H de 12 volts de corriente continua.
- Un controlador para regular el flujo de energía del panel a la batería
- Caja de fusibles, herrajes y alambrado.

Con este tipo de sistemas, los usuarios, que generalmente son casas en el medio rural pueden alimentar una carga de hasta tres lámparas compacto fluorescentes de 13 watts cada una y un contacto para conectar un radio, grabadora o televisión blanco y negro.

La batería es requerida en virtud de que el uso de la energía en el medio rural es generalmente en la noche, por lo que hay necesidad de almacenar la energía. Este tipo de sistemas fotovoltaicos aislados tienen las siguientes:



#### VENTAJAS

- Es la opción más económica para la alimentación de casas en el medio rural.
- Son sistemas de fácil y rápida instalación.
- Es la única alternativa de solución cuando las casas en una comunidad rural se encuentran muy dispersas.
- Existe un fabricante nacional que ofrece paquetes de 75 y 50 watts a 6,000.00 y 4,300.00 pesos respectivamente.

#### DESVENTAJAS

- Solamente se puede suministrar energía eléctrica a 12 volts de corriente directa, salvo que se usara un inversor para suministrar corriente alterna, con lo cual se duplicaría el costo del sistema.
- En las áreas remotas donde se instalan sistemas fotovoltaicos aislados es difícil encontrar lámparas, radios, grabadoras o televisores de 12VCD.
- La operación y mantenimiento de estos sistemas requiere de una elemental capacitación de los usuarios, que en muchas ocasiones no se logra dado que es frecuente que los campesinos no hablen español.
- Al ser casas aisladas, si el usuario no es capaz de restablecer el servicio después de una falla, la reparación por parte de CFE, el municipio o el estado, puede tomar semanas.

### **1.3 SISTEMAS HÍBRIDOS**

Se definen como sistemas híbridos para la alimentación de cargas remotas y aisladas, aquéllos que combinan, por algún medio manual o electrónico una o más fuentes alternas (renovables) de energía con una convencional. Como ya se apuntó, en México existen 80,000 comunidades rurales que carecen de energía eléctrica. De éstas, 6,000 son de más de 100 habitantes, mismas que es posible electrificar mediante sistemas híbridos.

#### **1.3.1 CRITERIOS DE DISEÑO**

La electrificación de comunidades rurales en México, así como otras cargas remotas entre las que destacan repetidores de sistemas de comunicación, equipos de señalización en autopistas y vías férreas, boyas marinas, sistemas de adquisición de datos en plataformas petroleras, etc., mismas que por su naturaleza son de difícil acceso, representan cierta incertidumbre en términos de demanda de potencia y consumo de energía, así como condiciones ambientales variables.

Estas variables dependen en gran medida de la ubicación geográfica de la carga por alimentar, así como de los aspectos sociopolíticos y económicos de la comunidad; en virtud de lo anterior, el primer paso para llevar a cabo un proyecto exitoso será tener una clara definición y entendimiento de los objetivos del proyecto, por lo que es necesario estudiar las características, disponibilidad y aspectos económicos de las diferentes alternativas para la alimentación eléctrica de las cargas aisladas, objeto del presente estudio.

Existen 12 requerimientos específicos que deben ser satisfechos para la electrificación de cargas remotas, los cuales definen ampliamente los criterios de diseño, proporcionan una guía para la evaluación del diseño del sistema así, como un análisis confiable de costo beneficio.

Los 12 objetivos antes mencionados proporcionan una base común para evaluar las distintas alternativas tecnológicas para la alimentación de cargas remotas. La factibilidad de cada alternativa tecnológica deberá ser medida contra los 12 objetivos que a continuación se enumeran.

#### **1.3.1.1 ADECUADO PARA CARGAS REMOTAS**

Se debe tomar en cuenta la logística para el suministro de combustible, instalación, operación, mantenimiento y tiempo de respuesta para la reparación de fallas. ¿Qué tipo de infraestructura se requiere para soportar el sistema?

Las soluciones con fuentes de energía renovable son de particular interés para la electrificación de cargas remotas ya que no consumen recursos naturales no renovables y su impacto al medio ambiente es prácticamente nulo. La energía solar que diariamente incide sobre la superficie de la tierra representa 10,000 veces más energía que todos los combustibles fósiles quemados en el mismo día. Además, México se encuentra dentro de la franja de máxima radiación solar en el mundo. También existen en el territorio nacional importantes manifestaciones eólicas que empiezan a ser aprovechadas en el país.

#### **1.3.1.2 SUMINISTRO DE ENERGÍA DE LA MISMA CALIDAD QUE LA DE CFE**

Se debe dar un particular énfasis sobre la calidad del suministro de energía eléctrica. La aceptación por parte de los usuarios de los sistemas eléctricos para la alimentación de cargas remotas dependerá de qué tanto asemeja al suministro de una red eléctrica convencional.

Los criterios de evaluación deberán incluir la disponibilidad de energía proyectada, la facilidad del sistema para alimentar cargas muy variables en las 24 horas de un día, la capacidad para soportar transitorios, corto circuitos y sobrecargas, considerando que el servicio se proporciona 24 horas diarias. Las limitaciones en lo que a suministro de energía se refiere deben ser claramente identificadas.

#### **1.3.1.3 MÍNIMO COSTO DE ENERGÍA**

La evaluación del sistema debe reflejar los costos reales, sobre la base del *costo de la energía durante el ciclo de vida útil del equipo*. Incluyendo costos de capital, operación y mantenimiento de cada alternativa de solución, así como la energía generada por cada sistema. Hasta donde sea posible, se deben tomar en cuenta las fluctuaciones esperadas en el ciclo de vida útil del equipo de las componentes de costo más representativas.

#### **1.3.1.4. ALTA CONFIABILIDAD**

Es ampliamente reconocido que el aspecto más importante para lograr un suministro de energía eléctrica aceptable es su grado de confiabilidad. La evaluación de este criterio incluye el grado y frecuencia de riesgos técnicos del sistema, el tiempo promedio entre fallas, el grado de modularidad, así como los tipos de fallas y sus efectos.

#### **1.3.1.5 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

Una correcta administración de las labores de operación y mantenimiento sin duda redundarán en reducciones considerables de costos. Este aspecto es especialmente crítico en la alimentación eléctrica a las cargas remotas por su grado de inaccesibilidad. En el caso de comunidades rurales en México, es común encontrar algún habitante de las mismas que posea un tractor y un generador eléctrico a gasolina, estos campesinos tienen conocimientos básicos de mecánica y de electricidad, por lo que sería factible capacitarlos para que lleven a cabo las rutinas más simples de operación y mantenimiento, como reponer combustible, cambiar filtros, vigilar el electrolito de la batería, limpiar paneles solares, etera.

#### **1.3.1.6 OPERACIÓN DESATENDIDA**

El sistema se debe diseñar con un grado de automatismo tal que haga innecesaria la presencia regular de un operador, por lo que en caso de estimarse necesario se puede instalar adicionalmente un sistema de adquisición de datos para que en forma remota se puedan consultar las variables más importantes de la operación del sistema.

### **1.3.1.7 ACEPTACIÓN LOCAL**

Este es sin duda el requerimiento más importante, sobre todo en el caso de la electrificación de comunidades rurales ya que de él depende la instalación del sistema, así como la operación del mismo. Lo más recomendable en estos casos es involucrar a toda la comunidad desde la concepción original del proyecto, hacerlos participar en la obra civil así como en el montaje, las pruebas y puesta en servicio; esto, desarrollará un sentido de propiedad del sistema en los campesinos, y que lo cuidarán como si fuera de suyo.

Es de vital importancia hacerles notar que el uso irracional de la energía eléctrica, sobre todo en exceso de las condiciones originales de diseño, podrán causar daños irreversibles en algunos de los componentes del sistema, principalmente la batería.

También se deberá establecer un mecanismo de control para evaluar de manera permanente la forma en que se mejoran las condiciones de vida de los campesinos después de la puesta en servicio de estos sistemas híbridos.

### **1.3.1.8 SEGURIDAD**

Dado que los sistemas híbridos se diseñan fundamentalmente para operar en áreas remotas y de difícil acceso, la seguridad de personas y equipos es de vital importancia para evitar accidentes y daños al sistema híbrido o a cualquier otro equipo.

### **1.3.1.9 DURACIÓN**

La duración de este tipo de sistemas es muy importante para las consideraciones económicas y la aceptación del diseño. Ya que no todos los componentes del equipo tienen la misma duración, se deberá prever la reposición de algunos 2 o 3 veces durante el ciclo de vida del equipo. La batería, que representa un 30% del costo total del sistema, dura aproximadamente una tercera parte que la de los paneles solares y que la electrónica de potencia, por lo que habrá que tomar este hecho en cuenta al evaluar los costos de operación y mantenimiento del sistema.

### **1.3.1.10 FLEXIBILIDAD Y FACILIDAD PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD**

La relación existente entre un sistema híbrido remoto y la carga que alimenta, principalmente en el caso de comunidades rurales es extremadamente dinámica, sobre todo cuando la electricidad incide en forma positi-

va en la actividad económica de la población, por lo que se deberá prever la posibilidad de expandir el sistema en forma rápida y económica.

#### **1.3.1.11 CONDICIONES AMBIENTALES ADVERSAS**

El diseño del sistema, así como las características del equipo que lo integra deberá ser capaz de soportar severas condiciones ambientales, como lluvia, granizo, tormentas eléctricas, calor, frío, polvo, humedad y vientos huracanados.

#### **1.3.1.12 REPLICABILIDAD**

El diseño de este tipo de sistemas debe ser fácilmente multiplicado tantas veces como sea necesario para la alimentación de cargas remotas, tomando en cuenta las variables que afecten el tamaño del mismo. Entre estas variables podemos citar: altura sobre el nivel del mar, nivel de radiación solar promedio mensual, medición, duración y estacionalidad de velocidades del viento.

### **1.3.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

En lo sucesivo y con objeto de hacer más explícito el presente trabajo, se hará referencia a la electrificación, mediante un sistema híbrido de la comunidad María Magdalena, que se ubica 15 km al oriente del municipio de Actopan, en el estado de Hidalgo. Esta comunidad se localiza en la parte alta de la Sierra Madre Oriental y su acceso es a través de un estrecho camino de terracería, prácticamente intransitable durante la temporada de lluvias.

### **1.3.3 RESUMEN DE CARGAS**

En esta comunidad existen 20 casas habitación, una iglesia, una escuela, un auditorio, un pequeño comercio y se pretende instalar una clínica rural y una bomba para hacer llegar las aguas de lluvia captadas en aljibes hasta el centro de la población. Dada la situación económica de las comunidades rurales en México, es factible asignar rangos de consumo permitidos a los distintos tipos de servicios, por ejemplo, para una casa habitación se definió, de acuerdo con los jefes de familia de María Magdalena que tres lámparas fluorescentes compactas y un contacto serían suficientes.

Para el comercio, además de las tres lámparas y el contacto, se añadiría un segundo contacto para conectar un refrigerador. En la tabla siguiente, se muestra los tipos de servicios a proporcionar, el consumo diario de energía, así como la demanda máxima.

**Tipo de servicio kWh/día Unidades Días/sem kWh/día kW**

Tipo de servicio	kWh/día	Unidades	Días/sem	kWh/día	kW
Casa habitación	1.6	20	7	31.2	13.20
Escuela	6.3	1	5	4.5	1.32
Clínica	5.0	1	3	2.2	1.26
Iglesia	1.6	1	3	0.7	0.47
Auditorio	2.0	1	2	0.6	0.57
Comercio	4.2	1	6	3.6	0.48
Bomba de agua	2.3	1	7	2.3	0.75
<b>Total</b>				<b>45.0</b>	<b>17.30</b>

**1.3.4 CURVA DE DURACIÓN DE CARGA**

El patrón de consumo de energía eléctrica en las comunidades rurales y en general en las cargas remotas servidas mediante sistemas híbridos debe ser cuidadosamente analizado, a fin de trazar con el mayor grado de exactitud posible la curva de duración de carga. En la Figura 3 se aprecia la curva que, para la población de María Magdalena, se obtuvo de los patrones de consumo de localidades semejantes, que cuentan con energía eléctrica. Como se puede apreciar, el mayor consumo de energía se tiene durante las horas de la noche para la iluminación de las viviendas de los campesinos y, obviamente, el sol en dichas horas ya no está disponible, lo cual obliga al almacenamiento de la energía en una batería.

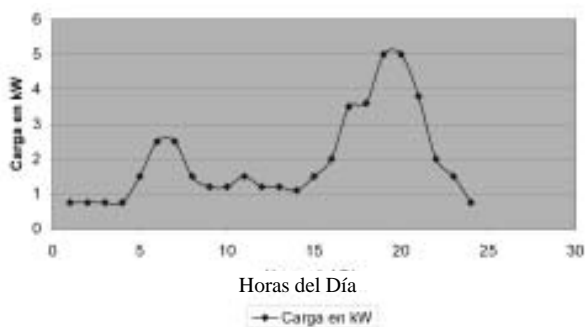


Figura 3

**1.3.5 CORRIENTE DIRECTA VS CORRIENTE ALTERNA**

Si bien los paneles solares proporcionan corriente directa, al combinar esta fuente con otras renovables, como la eólica y la hidroelectricidad, se encontró que resulta más económico que las turbinas de viento e hidráulicas a las cuales

se acoplan generadores, estos se seleccionaron de corriente alterna y después se transformó en directa a través de sendos rectificadores, ya que esta solución resultó más económica que usar generadores de corriente directa.

Por lo que se refiere a la alimentación de las cargas dentro de la población, se optó por usar corriente alterna, para lo cual fue necesario instalar inversores para transformar la corriente directa almacenada en la batería en alterna y alimentar la población. Esta decisión se tomó en virtud de que las refacciones de electrodomésticos en 12, 24 o 48 volts en corriente directa son muy difícil de encontrar en el área rural. En la Figura 4 se aprecia un diagrama de conexiones de los sistemas híbridos.

**Block Diagram of a Hybrid System**

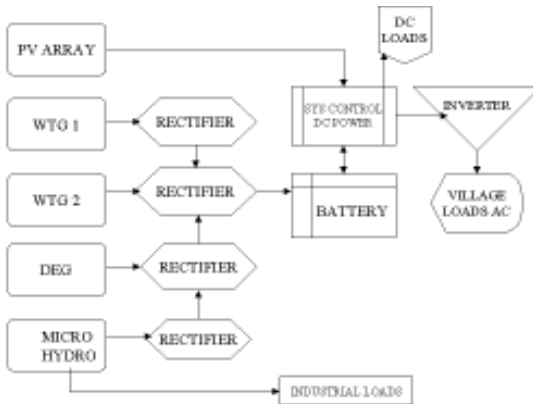


Figura 4

### 1.3.6 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

En el diagrama mostrado en la Figura 4, se aprecia que la energía proveniente tanto de las fuentes renovables como de la no-renovable (máquina diesel), pasa a través de un controlador electrónico que la administra, para ser almacenada en la batería, de donde se alimentan las cargas eléctricas demandadas por la población. Cuando los requerimientos de energía superan la aportación de las fuentes alternas, la diferencia es suministrada por la batería, con la consecuente reducción en su nivel de carga. El control electrónico (programable) tiene dentro de su *software* una instrucción para que cuando el nivel de carga de la batería sea de 35 o 40% la máquina diesel se arranque automáticamente para recargar la batería hasta el 100%,

una vez alcanzado este valor, el controlador ordenará en forma automática el paro de la máquina diesel.

Con este modo de operación se logra que la máquina diesel funcione a plena carga durante 8 horas cada 2 o 3 semanas con lo cual se alcanza una operación eficiente de la máquina, se optimiza el uso del combustible y no existen problemas de carbonización en los cilindros al operar la máquina para alimentar la carga variable que se muestra en la Figura 3, por otra parte, en la Figura 5, se muestra una curva típica del nivel de carga y descarga de la batería.

**Nivel de descarga y carga de la batería mediante generador diesel de respaldo**

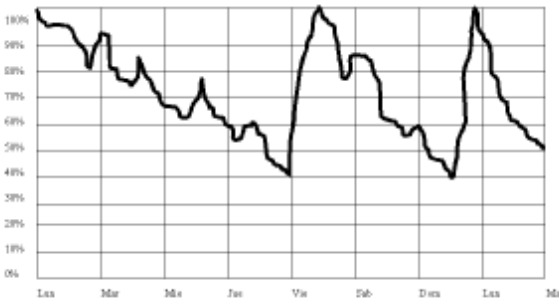


Figura 5

**1.3.7 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA**

Para este propósito se hace imprescindible contar con datos básicos sobre las características del sitio en el que se desea instalar un sistema híbrido. Los datos más importantes para el diseño de tal sistema son:

- Altura sobre el nivel del mar
- Vías de acceso al sitio
- Nivel de radiación solar por mes en langleyes/día
- Velocidad, estacionalidad y dirección de viento (máxima, mínima y promedio)
- Gasto de agua en metros cúbicos/seg. en estiaje y época de lluvia
- Caída máxima en el caudal de agua
- Carga eléctrica por alimentar
- Nivel de confiabilidad y calidad del suministro

Algunos de estos datos se pueden encontrar en publicaciones existentes, como en el libro Ingeniería de la Energía Solar de Almanza y Muñoz,



del que se pueden obtener valores de radiación solar por regiones geográficas del país, tanto en promedio anual como en valores mensuales. { $l_{\text{angeley}}/\text{día} = 4.846 * 10^{-4} \text{ kW/m}^2 = 0.01163 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ }

Por lo que se refiere a velocidades de viento, la Universidad Nacional Autónoma de México cuenta con cartas de las que se pueden obtener velocidades de viento máximas, mínimas y promedio por regiones geográficas del país, así como su duración, dirección y estacionalidad.

De requerirse datos más precisos, estos parámetros pueden ser medidos mediante piranómetros para la intensidad de la radiación solar y anemómetros para la velocidad de viento; sin embargo si se desea proyectar con valores medidos, se deberán registrar valores anuales con objeto de determinar la estacionalidad e intensidad de los recursos renovables que se pretenden aprovechar.

Con los datos anteriores es factible dimensionar cada componente del sistema en función de los recursos naturales y económicos de que se disponga. Para el caso de María Magdalena, en la tabla anterior, se encontró que no se requieren más de 45 kWh/día para alimentar eléctricamente las cargas del pueblo. Una vez conocidos los datos referentes a radiación solar y velocidad de viento en esta comunidad, se advirtió que no se cuenta con recursos para generación hidráulica. El modelo de diseño se fundamenta en el máximo aprovechamiento de los recursos renovables, pero limita el uso del capital. Para el caso que nos ocupa, la combinación óptima, de acuerdo al modelo fue:

### 1.3.8 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

#### 1.3.8.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Sistema híbrido fotovoltaico, eólico respaldado por un generador a diesel

Batería de 131 kWh

Generador a diesel de 17.3 kW

Arreglo fotovoltaico de 4.32 kW(pico)

Inversor CD/CA de 7.5 kW de estado sólido

#### 1.3.8.2 GENERADOR A DIESEL

- 3 cilindros, 1800 RPM, enfriado por aire
- Montado sobre patín metálico para reducir vibraciones
- Sistema de lubricación de 750 horas
- Sistema de combustible a nivel de piso, tanque principal 4,000 li-

tros, tanque diario 100 litros, separador agua/combustible, filtros duales para combustible

- Filtro de aire de dos pasos, servicio pesado, con elementos reemplazables
- Sistema de arranque a 24 VDC

En función de las cargas asignadas por tipo de servicio, se obtuvieron las siguientes frecuencias en servicios de mantenimiento y reposición de combustible del generador a diesel:

- Cambios de aceite semestrales
- Limpieza elementos carbonizados cada 1,500 hs de operación
- Mantenimiento mayor a las 6,000 hs de operación
- Reposición de combustible bimestral
- Reemplazo de la máquina a las 50,000 hs de operación.

Alternador

- Trifásico, sin escobillas, acoplamiento directo
- Potencia de salida 17.3 kW, 21.6 KVA, @ 80% de factor de potencia @ 60 Hz

#### 1.3.8.3 RECTIFICADOR

- Trifásico de 80 A
- Modo corriente/voltaje, programable vía el controlador electrónico

#### 1.3.8.4 ARREGLO FOTOVOLTAICO

- Potencia máxima de salida 4.32 kW
- 2 subarreglos, cada uno con 4 cadenas de 9 módulos
- Voltaje máximo:  $V_{max} = 195$  VDC
- Corriente de corto circuito:  $I_{cc} = 29.6$  A
- Cada subarreglo cuenta con diodos de bloqueo, protección contra transitorios de voltaje, así como un punto para prueba y diagnóstico de cada cadena
- Herrajes para montaje sobre gabinetes metálicos o sobre el piso
- Opción para expandir el sistema hasta 8.64 kW.

#### 1.3.8.5 GRUPO TURBINA-GENERADOR EÓLICO

- 5 kW de capacidad nominal
- Eje horizontal, 3 aspas, regulado por el controlador electrónico
- Diseñado para operar con velocidades de viento entre 3 y 15 m/s.

#### 1.3.8.6 INVERSOR

- 7.5 KVA continuos, 22.5 KVA máximos en forma instantánea
- 120 VCD nominales, rango de voltaje: 100–160 VCD
- 92% de eficiencia a carga plena, 88% de eficiencia a 50% de carga
- Distorsión armónica total máxima: 5% (Norma 519 IEEE)
- Factor de potencia: de 0.5 atrasado a 0.7 adelantado
- Arranque automático, operación aislada
- Posibilidad de operar en paralelo con otros inversores
- Capacidad de comunicación con el controlador electrónico del sistema
- Construcción modular para fácil mantenimiento en el campo
- Medición de funciones eléctricas básicas, estado y diagnóstico del sistema
- Tiempo mínimo entre fallas (MTBF) 50,000 hs.

#### 1.3.8.7 CONTROLADOR ELECTRÓNICO

- Sistema de control basado en micro–procesadores
- Regulación dual de circuitos fotovoltaicos
- Control de arranque, paro y paro de emergencia de la máquina diesel
- Control de la corriente de salida del rectificador
- Control de la operación del grupo turbina generador eólico
- Sistema de alarma para fallas del sistema, incluyendo la batería
- Medición de parámetros eléctricos básico (CA/CD) y estado de todo el sistema
- Horas de operación de la máquina a diesel
- Control supervisorio de los inversores a través de un puerto de comunicación
- Puerto para control y monitoreo remoto de la operación del sistema
- Control de interruptores manuales de arreglo solar, rectificador, generador eólico, batería y línea de distribución

#### 1.3.8.8 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

- Red de distribución monofásica, 120 VCA
- Acometidas para las 20 casas, la bomba, la iglesia, la escuela, el auditorio y la tienda
- Interruptor con fusible de 10 A máximo en cada acometida.

### 1.3.9 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los componentes básicos del sistema, como ya se ha mencionado, son los módulos solares, el grupo turbina-generador eólico, la batería, los rectificadores, los inversores, el controlador electrónico, el generador a diesel de respaldo, la red de distribución y las cargas por alimentar.

El arreglo solar de 4.32 kW consiste de 72 módulos de 60 watts cada uno configurados para suministrar 120 VCD a la batería siempre que el sol esté brillando. Los paneles solares se diseñaron para ser montados en dos gabinetes metálicos que contienen la electrónica de potencia, el banco de baterías, el generador a diesel, así como el tanque de combustible. El arreglo es fijo y está orientado hacia el sur con un ángulo de inclinación de 15 grados. No se contempló la posibilidad de usar un mecanismo para mover el arreglo solar y aprovechar al máximo la energía del sol, fundamentalmente por razones de costo.

Para suministrar el voltaje de carga adecuado a la batería, el arreglo solar está dividido en series de 9 módulos cada uno con un voltaje pico nominal de 16.5 VCD, por lo que el voltaje máximo de carga a la batería es de  $V_c = 16.5 * 9 = 148.5$  volts. Para obtener los 4.32 kW de potencia del arreglo partiendo de la base que cada panel aporta 4.5 A, se conectan las series de 9 módulos en paralelo, haciendo un total de 8 series de 9 módulos, por lo que la potencia pico será:  $W_p = 4.5 \text{ A} * 8 * 120 = 4,320$  watts.

El generador a diesel de respaldo fue seleccionado entre los que ofrecen mejores condiciones de confiabilidad y bajo mantenimiento, es enfriado por aire, por lo que no se requieren bombas de agua ni existe la posibilidad de fugas. El sistema de lubricación de 750 horas difiere las visitas de técnicos para efectos de mantenimiento, cuenta con un sistema de arranque negro a través de una batería auxiliar de 24 VCD, que está permanentemente cargada por un módulo solar del mismo voltaje, lo cual le da una gran flexibilidad a la operación del sistema. (Ver Figura B).

El alternador trifásico acoplado al motor a diesel proporciona energía eléctrica, la cual es rectificada en el dispositivo de estado sólido y su función es recargar el banco de baterías. El procedimiento específico de carga del banco de baterías es controlado por el sistema automático a través de un control corriente/voltaje del alternador / rectificador.



Figura B

El grupo turbina-generador eólico está diseñado para alta confiabilidad y mantenimiento mínimo, condición imprescindible para la operación en lugares remotos y desatendidos. La potencia generada es rectificadora para cargar la batería siempre que se tengan las condiciones mínimas de velocidad del viento. La torre sobre la cual se monta el conjunto turbina generador tiene 20 metros de altura y soporta velocidades de viento hasta de 60 m/s, sin embargo, como la velocidad para máxima potencia es de 15 m/s, cuando este valor se excede, un freno magnético detiene el giro de las aspas para evitar daños al equipo.

El banco de baterías suministra corriente directa al inversor y se calculó para tener una autonomía de 2.3 días, esto es, en dicho lapso el banco es capaz de alimentar la carga eléctrica de la comunidad, sin que existan aportaciones de los paneles solares y/o del generador eólico. Se espera que una vez transcurrido este tiempo, el banco se encuentre a un 35% de su nivel de carga y será hasta entonces que el controlador electrónico arrancará en forma automática el generador a diesel para recargar el banco de baterías.

El banco está configurado como una serie de 60 celdas de 2 volts cada una, con una capacidad de 1,092 Amper-Horas con relación de 72 horas de descarga; este banco de baterías de servicio pesado fue seleccionado para darle una mayor flexibilidad al sistema híbrido de María Magdalena.

La energía almacenada en la batería es convertida a corriente alterna a través del inversor de estado sólido de 7.5 kW de capacidad que, como se apuntó es capaz de soportar sobrecargas momentáneas de hasta un 300%, como arranques de motores (compresor del refrigerador de la tienda).

El controlador electrónico microprocesado monitorea y regula la operación del sistema en su conjunto con objeto de proporcionar un comportamiento óptimo del mismo bajo condiciones variables.

Las funciones específicas proporcionadas por el controlador incluyen carga y control del banco de baterías, regulación de la carga suministrada por el generador eólico y los arreglos solares, administración de la carga, diagnóstico de fallas (alarmas) y medición local y remota de parámetros.

La red de distribución opera a 120 VCA, está soportada sobre postes metálicos y los conductores seleccionados fueron del tipo THW-75, de cobre, calibre número 2 AWG, cuya capacidad para llevar corriente es de 170 A. Es de mencionarse que se seleccionaron conductores aislados, afin de evitar fallas que pudieran dañar el sistema; además, se estableció un radio de operación de la red de distribución de 300 m contados a partir del sitio donde fue instalado el sistema híbrido para evitar problemas de bajo voltaje.

Para el caso de viviendas localizadas fuera del radio de acción antes mencionado se ofreció, a través de las autoridades estatales, en calidad de donativo, un terreno de la superficie necesaria, localizado dentro del radio de 300 m citado. A aquellos campesinos que por motivos personales no quisieran cambiar su vivienda, se les ofreció la alternativa de solución de los sistemas fotovoltaicos aislados que se alude en el inciso 1.2.

### **1.3.10 ORGANIZACIÓN COMUNITARIA**

Se ha mencionado que para que los sistemas híbridos que nos ocupan tengan éxito en los programas de electrificación rural se hace necesario involucrar a los campesinos desde la conceptualización del proyecto, se les solicita colaborar en la cimentación requerida por el equipo, en las maniobras de descarga, montaje y puesta en servicio del equipo y una vez operando éste, previa capacitación, se les pide llevar a cabo las rutinas simples de operación y mantenimiento, como cambio de filtros, limpieza de paneles solares, terminales del banco de baterías, así como del generador a diesel, reposición de combustible y electrolito de la batería, étera.

Con objeto de hacer frente a los gastos de operación y mantenimiento, se les organiza en una sociedad cooperativa en la que todos los beneficiarios del servicio aporten cuotas diferenciadas en función del tipo de servicio que tengan. Esto significa que el o los dueños de tiendas o comercios

que cuenten con un refrigerador, tendrán que aportar más que los campesinos que solamente usen el servicio para su casa habitación.

Respecto de los servicios comunitarios, como el de la iglesia, el de la bomba y el auditorio, estos gastos se distribuyen equitativamente entre los habitantes de la comunidad.

Este tipo de organización presupone tratar como adultos a los campesinos, lo cual les proporciona un sentido de propiedad del equipo y de responsabilidad de su correcta operación y mantenimiento. Lo que se traduce en cuidados extremos respecto del equipo.

### 1.3.11. RESUMEN DEL SISTEMA

Ubicación	María Magdalena, Municipio de Actopan, estado de Hidalgo	
Carga inicial	45 kWh/día	
Batería	Tipo	FGHS-13
	Voltaje	120 VCA
	Amp-Hora	1092 @ 72 hr rate
	Capacidad	131 kWh
Arreglo solar	Módulo	IP-60 60 Wp
	# de Módulos	72
	Capacidad arreglo	4.32 kW
Generador diesel	Tipo	Lister TR-3
	Capacidad	17.28 kW
Generador viento	Tipo	Colibrí-Reliance
	Capacidad	5 kW
Contribución	Solar	32.2 %
Esperada	Viento	33.6 %
	Diesel	34.2 %

### 1.3.12 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de mantenimiento constituyen una importante parte del total de costos considerados dentro del esquema de *ciclo de vida útil del equipo*, y sobre todo en el caso de alimentación de cargas eléctricas en áreas remotas, y en el caso de comunidades rurales donde es difícil encontrar personal capacitado para llevar a cabo dichas funciones.

En tal virtud, los sistemas híbridos deben ser diseñados con criterios de operación prácticamente desatendida. Únicamente se requerirá la presencia de un vecino de la población previamente capacitado para llevar a cabo, en tiempo parcial, las rutinas de mantenimiento más sencillas. Lo anterior se puede lograr mediante sistemas totalmente automatizados con esquemas de autodiagnóstico que puedan ser consultados remotamente, para lo cual se requerirá de un sistema de radiotelefonía rural.

Por ejemplo, los requerimientos de mantenimiento de un generador a diesel están determinados por las horas de operación, normalmente los cambios de aceite se efectúan cada 250 horas, por lo que, para el caso de operación continua de la máquina, se requerirán (250/24) aproximadamente 11 días para los cambios de aceite, lo cual significa (365/11) 34 visitas por año. Evidentemente, ésta resulta una frecuencia inaceptable para el caso de comunidades rurales.

En función de los valores de niveles de radiación solar promedio anual y velocidades de viento promedio por mes obtenidos mediante datos existentes, o en su caso medidos, se definieron las contribuciones de energía por tipo de fuente mostradas en el punto 1.3.11, por lo que la aportación del generador a diesel en términos de energía será:

$$\text{kWh (gen diesel)} = 0.342 * 45 \text{ kWh/día} * 365 \text{ día/año} = 5617.35 \text{ kWh/año}$$

Por lo tanto, las horas de operación anualizadas de la máquina diesel, suponiendo que operara a plena carga cuando la batería está al 35% de su nivel son:

$$\text{Horas operación a carga plena} = 5617.35 \text{ kWh}/17.28\text{kW} = 325 \text{ hs.}$$

De lo anterior se desprende que para el tipo de máquina seleccionada con sistemas de lubricación que requieren mantenimiento cada 750 horas de operación se tendrá que revisar el equipo, para fines de mantenimiento, cada dos años, con la consecuente reducción en los costos por tal concepto.

El arreglo fotovoltaico, por no tener partes en movimiento y ser de estado sólido, prácticamente no requiere mantenimiento. Es suficiente anualmente revisar conexiones eléctricas para comprobar que estén bien



apretadas y, cada mes, remover el polvo de la superficie de los paneles solares.

El generador eólico está diseñado para operación remota, por lo que son mínimas las partes móviles y los cojinetes son sellados, por lo que no requieren lubricación. Una frecuencia en los mantenimientos anual es recomendada para estos equipos.

El inversor, cuya función es transformar la corriente continua en alterna, es un conjunto de circuitos electrónicos de estado sólido, diseñado para trabajo continuo en forma desatendida y en ambientes agresivos. El diseño es modular, por lo que los circuitos electrónicos montados en tablas pueden ser cambiados fácilmente en el campo.

Indudablemente el banco de baterías es la parte más delicada de los sistemas híbridos; requiere de vigilancia de valores de voltaje por celda de limpieza de conexiones sulfatadas, así como de vigilancia constante de los niveles del electrolito en cada celda. Es recomendable llevar a cabo un programa de mantenimiento semestral se esté pues, como se indicó, este elemento representa una tercera parte del costo del sistema y su vida útil, en el mejor de los casos, es de ocho años.

El controlador está diseñado para operación remota en ambientes agresivos de polvo, temperatura y humedad, sin que requiera de mantenimiento; además, cuenta con modo de autodiagnóstico y monitoreo en tiempo real del comportamiento del resto de los elementos del sistema. Se puede afirmar que este equipo no necesita mantenimiento durante su vida útil, a menos que se desee llevar a cabo modificaciones en los ajustes de la programación original.

En caso de alguna falla en el controlador electrónico o en el inversor, la población puede ser alimentada eléctricamente con el generador a diesel a través del interruptor manual de transferencia; sin embargo, esto incrementará los costos de operación y mantenimiento del sistema.

En resumen, entre las necesidades de operación y mantenimiento se pueden enumerar como sigue:

- Se requiere un operador en el sitio durante 4 horas por semana para llevar a cabo funciones de verificación de alarmas y registro de datos de operación básicos.

- Un mecánico deberá visitar cada 6 meses el equipo para cambiar aceite y filtros, reponer electrolito de la batería, limpieza de paneles y conexiones de la batería.
- El generador diesel eléctrico deberá ser *descarbonizado* una vez al año, y en caso necesario se deberá reponer combustible.

La máquina diesel eventualmente requerirá de un mantenimiento mayor, en función de las horas de operación anuales. Es recomendable que este mantenimiento se lleve a cabo en un taller especializado, donde se cuente con personal especializado, refacciones y herramental. De ser posible, se debe enviar un generador provisional para evitar daños a la batería o en su defecto cambiar la programación del módulo control para que cuando no se tenga disponible la máquina diesel, al llegar la batería al 35% de su nivel de carga, se desconecte el sistema, aunque ello represente una interrupción de servicio. El sistema deberá ser restablecido automáticamente por el controlador una vez que el generador eólico y el arreglo solar hayan llevado nuevamente la batería al 100% de su nivel de carga.

Por lo que se refiere a refacciones y herramientas, se deberán tener en el sitio las más elementales, sobre todo filtros, empaques, fusibles y, de ser necesario, en caso de comunidades muy remotas, se pueden dejar algunos de los componentes electrónicos más sensibles a fallas.

El consumo de combustible se puede pronosticar dependiendo de la combinación proyectada del arreglo solar, generador de viento y máquina diesel, sin embargo por la falta de datos estadísticos de más largo plazo, el pronóstico de consumo de combustible tiene un grado de incertidumbre importante como se desprende de los datos reales de aportación de energía por tipo de fuente durante los primeros seis meses de operación del sistema mostrados en la figura 6 en la que se aprecia que la aportación de la generación eólica es de aproximadamente 50%, la solar 35% y el diesel 15%, lo cual contrasta con los valores de proyecto mostrados en el punto 1.3.11.

### **1.3.13 ANÁLISIS DE COSTOS**

Para este tipo de aplicaciones de fuentes renovables de energía en las que la inversión inicial es muy alta y los costos de operación y mantenimiento muy bajos, el análisis de costos para compararlo con otras alternativas de solución se deberá hacer sobre la base del *ciclo de vida útil del equipo*, esto es,

**Porcentaje de contribución por fuente de energía cifras reales 1991**

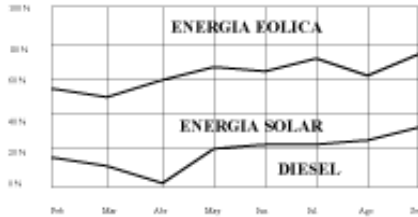


Figura 6

considerar la suma de costos de capital y de operación y mantenimiento durante la vida útil del equipo. Esta cantidad se divide entre la energía total generada por el sistema a lo largo de la vida útil del mismo y se obtendrá el costo unitario de generación.

Para cualquier alternativa de solución, si la carga por alimentar se considera constante a lo largo de los 25 años de duración promedio del equipo los kWh requeridos en dicho lapso por la población de María Magdalena sería:  $45 * 365 * 25 = 410,625$  kWh

El costo actual del equipo instalado en María Magdalena es de 906 mil pesos y el de operación y mantenimiento, durante los 25 años, es de 1'248,000 pesos por lo que el costo por kWh para esta alternativa de solución sería de:

Costo por kWh Sistema híbrido =  $(906.000 + 1'248,000)/410,625 = \$ 5.25/\text{kWh}$

En la figura 6 se muestra un gráfico con las aportaciones por fuente de energía durante los primeros seis meses de operación del sistema híbrido de María Magdalena. En el gráfico de referencia se aprecia que el viento aportó aproximadamente 50% de la energía, los paneles solares el 35% y el 15% restante fue suministrado por el grupo electrógeno. Como se mencionó, es factible reducir a cero la aportación del generador diesel, para lo cual es necesario incrementar en forma sustancial el número de generadores eólicos y de paneles solares, con los consecuentes incrementos en los recursos de capital.

### 1.3.14 OTROS SISTEMAS HÍBRIDOS

Posterior a la construcción del sistema híbrido de María Magdalena se desarrollaron en el país otros sistemas, entre los que destacan el de San Antonio Agua Bendita, en el Estado de México y el de Xcalac, en Quintana Roo. En la parte final se muestran fotografías relacionadas con ambos sistemas.

Figura 8: Camino a San Antonio Agua Bendita.

Figura 9: Sistema Híbrido San Antonio Agua Bendita.

Figura 10: Rectificadores, Controlador lógico programable e inversores de San Antonio Agua Bendita.

Figura 11: Máquina diesel de respaldo.

Figura 12: Interior del PLC.

Figura 13: Banco de baterías (1,110 A-H, 125 VCD) San Antonio Agua Bendita.

Figura 14: Paneles solares y piranómetro San Antonio Agua Bendita.

Figura 15: Generador eólico y anemómetro San Antonio Agua Bendita.

Figura 16: Generadores eólicos Xcalac, Quintana Roo.

Figura 17: Vista aérea Xcalac, Quintana Roo.



Figura 8



Figura 9



Figura 10



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14



Figura 15



Figura 16



Figura 17

#### **1.4 OTRAS TECNOLOGÍAS PARA ALIMENTACIÓN DE CARGAS REMOTAS**

Evidentemente para poder tomar la decisión de alimentar la población de María Magdalena a través de un sistema híbrido como el descrito fue necesario analizar varias alternativas de solución.

##### **1.4.1 TECNOLOGÍAS ANALIZADAS QUE NO SE CONSIDERARON VIABLES PARA LA ALIMENTACIÓN DE LA COMUNIDAD RURAL DE MARÍA MAGDALENA**

###### **1.4.1.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE**

Esta es una alternativa de solución de muy alta tecnología, no totalmente madura, de costos muy elevados y que requiere de personal altamente calificado, por lo que no se estimó como una alternativa de solución viable para este tipo de aplicaciones.

###### **1.4.1.2 BIOMASA**

Esta es una tecnología muy usada en aquellas comunidades rurales orientadas a la ganadería o a la producción avícola, donde las excretas animales se

depositan en biodigestores anaeróbicos para la obtención del gas metano que es usado para fines de cocción de alimentos principalmente; sin embargo, esta no es una alternativa de solución para generación eléctrica en comunidades rurales.

#### **1.4.1.3 DENDROTÉRMICAS**

En este tipo de centrales eléctricas se incineran desperdicios de madera proveniente de aserraderos en áreas boscosas para producir calor y vapor, y con él accionar un grupo turbina generador para la producción de energía eléctrica.

#### **1.4.1.4 MICROHIDROELECTRICIDAD**

Dado que en el poblado de María Magdalena las fuentes de aprovisionamiento de agua son únicamente aljibes que captan agua de lluvia, esta alternativa de solución no es viable.

#### **1.4.1.5 TERMOSOLARES**

Estas centrales aprovechan el calor radiado por el sol, el cual se capta, refleja y magnifica en espejos parabólicos que van siguiendo la trayectoria del sol accionados por motores programados por computadora. En el foco de la parábola se instala un tubo por el que se hace circular un fluido de trabajo al que se le transfiere calor, mismo que se recupera en un intercambiador y aprovecha para la producción de vapor y energía eléctrica. Esta es una tecnología cara y aplicable solamente en escalas de cientos de MW, por lo que no es alternativa para esta aplicación.

### **1.5 TECNOLOGÍAS ANALIZADAS QUE SE CONSIDERARON VIABLES PARA LA ALIMENTACIÓN DE MARÍA MAGDALENA, ADEMÁS DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS**

#### **1.5.1. GENERACIÓN A DIESEL CON EQUIPO CENTRALIZADO**

Las máquinas deben ser localizadas en el centro de la población y dimensionadas para poder alimentar la demanda máxima ya determinada en la curva de duración de carga. Con objeto de que las opciones sean comparables y en virtud de que en el sistema híbrido el diseño se conceptualizó sobre la base de servicio continuo 24 horas diarias 365 días/año, para el caso de alimentación a María Magdalena con generación a diesel, se debe prever por lo menos una contingencia, por lo que se requerirán mínimo dos máquinas.



Tomando en cuenta que las máquinas diesel serán las únicas fuentes de alimentación a la población, éstas deberán ser diseñadas con particular énfasis en los contenedores del equipo, los sistemas de enfriamiento y lubricación, cimentación, dispositivos amortiguadores, control, instrumentación y alarmas de las máquinas, sistemas de seguridad y generador eléctrico. Por lo que se refiere a la red de distribución de energía eléctrica, ésta será la misma en todas las alternativas analizadas. En la Figura 7 se aprecia un diagrama esquemático de la alimentación eléctrica a María Magdalena mediante dos generadores a diesel centralizados.

#### GENERACION DIESEL CENTRALIZADA

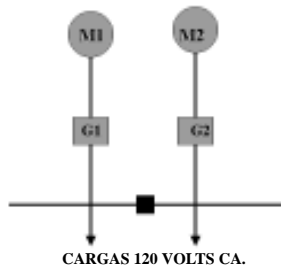


Figura 7

De acuerdo con las características de las máquinas diesel proporcionadas por el fabricante, se requieren 23,980 litros de combustible para poder suministrar a la población 16,425 kWh anuales (1.46 lt/kWh). Del análisis de la curva de duración de carga mostrada en la Figura 3 se infiere que el grupo motor generador estará operando en los períodos de baja carga a menos del 25% de su capacidad nominal, lo cual representa consumo ineficiente de combustible, carbonización y, por ende, la necesidad de mantenimientos más frecuentes.

Por lo que se refiere al costo de generación, sobre la misma base del ciclo de vida útil del equipo, estará integrado por: costo de capital correspondiente a las dos unidades, equipo de control, protección y medición, sistema automático para la administración de la generación y la carga por alimentar, tanques de combustible, etc, el cual fue de \$ 770,000.00 y el costo de operación y mantenimiento durante 25 años, suponiendo constante la cantidad de energía suministrada a la población, resultó ser de: \$4'973,000.00.

Sobre esta base, el costo unitario de generación, considerando el concepto de ciclo de vida útil del equipo, fue de:

$$(770,000.00 + 4'973,000.00)/410,625 = \$ 13.99/\text{kWh}$$

#### Ventajas

- Inversión inicial baja
- Modelo usado frecuentemente para alimentar cargas remotas
- Tecnología madura
- Existencia de unidades de diferentes capacidades así como refacciones
- Adecuada para cargas reactivas
- Operación independiente de condiciones climáticas
- Elevada relación potencia/peso
- Fácil de operar y mantener

#### Desventajas

- El equipo se debe dimensionar para cubrir la demanda máxima
- Dada la gran diferencia entre demanda promedio y demanda máxima, la máquina operará a menos del 50% de su capacidad nominal
- En áreas remotas e inaccesibles se complica la logística de suministro de combustible y refacciones
- Problemas ambientales relacionados con emisión de contaminantes, aceite usado, depósitos de aceite

### **1.5.2 EXTENSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA DE LA SUMINISTRADORA**

Si bien ésta no es una tecnología para alimentación de cargas remotas *per se*, representa el método tradicional en que se han venido electrificando las comunidades rurales en todo el mundo desde principios de siglo. En tal virtud, es necesaria la comparación entre la forma tradicional de electrificación de comunidades rurales y la electrificación de las referidas comunidades mediante tecnologías emergentes, basándose en fuentes renovables de energía.

Para el caso de María Magdalena, la extensión de la red de distribución representaba la construcción de un alimentador de distribución de 23 KV de 15 km de longitud a través de una región montañosa e inaccesible, un transformador de distribución trifásico de 30 KVA de 23,000-220/127 volts, montado en poste de concreto de 11 metros con su equipo de protección

consistente en tres cortacircuitos fusible y tres apartarrayos de óxido de zinc y la red de distribución de baja tensión, que es un requerimiento para todas las alternativas de solución.

En estricto rigor, la electrificación de esta comunidad significa un incremento en la capacidad instalada en el parque de generación de CFE de 15 kW y se puede decir lo mismo de la capacidad equivalente en los sistemas de transformación y transformación (subestaciones de potencia y líneas de transmisión).

Respecto del análisis económico, es de mencionarse que el costo del km de una línea de distribución aérea en lugares de fácil acceso es del orden de \$ 60,000.00; en las áreas montañosas e inaccesibles como la que nos ocupa, este costo de triplica.

La inversión para llevar una línea de 23 KV desde el último poste de la suministradora hasta el centro de la comunidad (15 km) hubiera sido de \$2'800,000.00. Por lo que se refiere al costo de operación y mantenimiento, está integrado por el patrullaje rutinario del alimentador de distribución, la reparación de fallas de aisladores, conductores, postes, fusibles apartarrayos, transformador de distribución y acometidas. El origen de estas fallas generalmente es vandalismo, tormentas, descargas atmosféricas, objetos extraños sobre las líneas y conductores reventados. Otra importante componente de costo de operación es la del proceso comercial, cuyas funciones básicas son: Lectura de medidores, facturación, reparto de facturas (recibos), cobranza, corte por falta de pago y reconexiones.

Para el caso de María Magdalena, los costos de operación y mantenimiento en que hubiera incurrido Luz y Fuerza del Centro si la comunidad se hubiera electrificado en forma tradicional hubieran sido de \$ 350,000.00 anuales, por lo que en ciclo de vida útil del equipo este costo se elevaría a \$8'750,000.00, incluyendo los costos de operación y mantenimiento de la línea de distribución así como los del proceso comercial.

Conbase en lo anterior, el costo unitario del kWh suministrado a la comunidad mediante la extensión de la red de distribución se obtendría en la siguiente forma:

$$(2'700,00.00 + 8'750,00.00)/410,625 = \$ 27.88/\text{kWh}$$

Resulta obvio que el costo unitario de la energía para esta alternativa de solución es altamente dependiente de la distancia del alimentador de distribución ya que afecta tanto el costo de capital como el de operación y mantenimiento.

#### Ventajas

- Ofrece los beneficios de un sistema igual al de las grandes ciudades
- La red de distribución es segura, silenciosa y aceptada por la comunidad
- Expandible fácilmente para el caso de aumentos de carga
- Servicio de calidad en términos de voltaje y frecuencia
- Capacidad para soportar sobre cargas

#### Desventajas

- Costos elevados tanto de capital como de operación y mantenimiento
- La continuidad del servicio es altamente dependiente de la facilidad de acceso a todos los postes de la línea para localización y reparación de fallas. La experiencia ha demostrado que los tiempos promedio de interrupción a los usuarios de las áreas rurales es 3 veces mayor que las de los usuarios de las áreas urbanas.

### **1.5.3. RESUMEN DE COSTOS UNITARIOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOBRE LA BASE DEL CICLO DE VIDA ÚTIL DEL EQUIPO**

<b>SISTEMA</b>	<b>COSTO \$/kWh</b>
Híbrido	5.25
Diesel Centralizado	13.99
Extensión de la red	27.88

## 2. ENERGÍA TERMOSOLAR

La humanidad ha subsistido durante milenios gracias al sol. Particularmente en el aspecto energético, la energía solar ha sido, es y será una fuente inagotable de energía. Su aprovechamiento directo o indirecto, de forma natural o artificial, está presente en las estructuras de vida urbana y rural.

Promover el desarrollo de la energía solar es un imperativo actual que no se puede postergar por las siguientes razones:

1. Desde hace más de un siglo las principales fuente energética de la humanidad han sido los combustibles fósiles, y éstos son recursos naturales no renovables, que se extinguirán en el curso del siglo XXI, por lo que su uso se debe racionalizar al máximo.

2. No es remota la posibilidad de que antes de que se extingan las reservas de combustibles fósiles, el uso de éstos para transporte, calefacción, refrigeración y generación eléctrica sea proscrito por problemas de contaminación ambiental.

En virtud de lo anterior, es necesario incrementar el aprovechamiento de la energía solar llevando su aplicación a sistemas más dinámicos y directos, toda vez que la energía solar, como fuente energética, destaca por las siguientes características:

- Elevada calidad energética
- Pequeño o nulo impacto negativo en el medio ambiente
- Constituye una fuente inagotable de energía

Sin embargo, su uso no está exento de problemas, siendo los principales:

- Se produce en forma semi aleatoria por los ciclos día-noche, invierno-verano
- Llega a la tierra en forma dispersa
- No se puede almacenar en forma directa, por lo que se hace necesaria una transformación energética.

La Figura 18 muestra la forma más elemental de aprovechar la energía solar a través de una caja de calor; sin embargo, es importante diferenciar las distintas formas de captación solar que se consideran dentro del concepto de las energías renovables, pues como se mencionó en el primer párrafo de este apartado, la energía solar está presente prácticamente en todas las manifestaciones energéticas que conocemos, como se ilustra en la Figura 19.

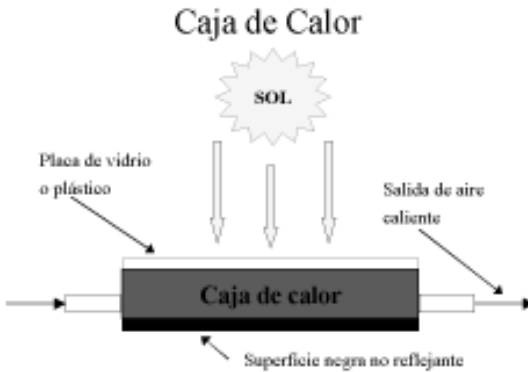


Figura18

El efecto térmico producido por la energía solar hace posible que el hombre lo utilice directamente mediante diferentes dispositivos artificiales para concentrarlo y hacerlo más intenso transfiriéndolo a los fluidos de trabajo que le interesan.

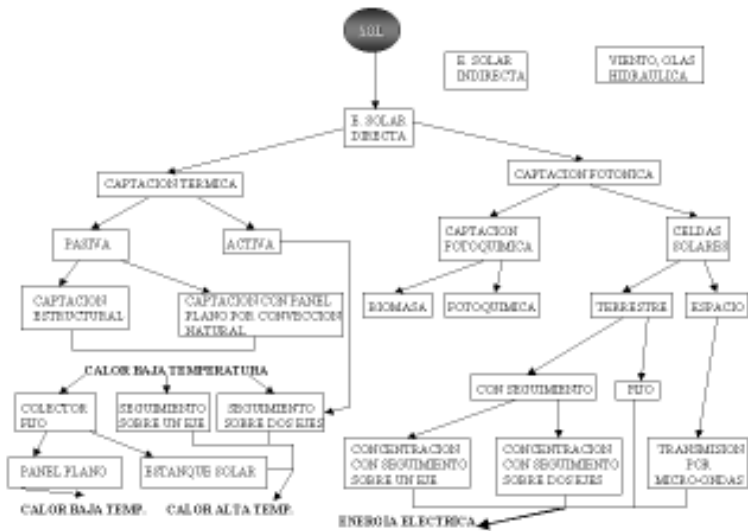


Figura 19

La energía solar, al ser interceptada por una superficie absorbente, se degrada, apareciendo el efecto térmico. Lo anterior se logra sin la intervención de elementos mecánicos es decir, en forma *pasiva* o a través de elementos mecánicos, esto es, en forma *activa*.

## 2.1 ENERGÍA SOLAR PASIVA

La energía solar pasiva es una forma de aprovechamiento que capta la energía solar, la almacena y distribuye en forma natural, sin la intervención de elementos mecánicos.

El hombre, durante la historia de la humanidad, ha buscado siempre la protección contra condiciones climáticas adversas, sean éstas de altas o bajas temperaturas; en términos generales, la energía solar pasiva busca el confort del hombre mediante la disposición óptima de una serie de elementos arquitectónicos, aprovechando al máximo la energía solar recibida, así como las posibilidades de ventilación natural. Estos elementos, en ocasiones, no difieren mucho de los utilizados por la arquitectura tradicional, y que muchas veces, constituyen ejemplos clásicos de energía solar pasiva.

Sus principios están basados en las características y disposición de los materiales empleados en la construcción, formando parte inseparable de la estructura del edificio. Ejemplos típicos de lo anterior son los aislamientos térmicos de las losas de las casas habitación en Mexicali, B.C., o en Hermosillo, Sonora. Las cuales se construyen con aislamientos térmicos de espumas de poliuretano, colocados entre la losa y un falso plafón, con lo que se logra una importante reducción en la temperatura interior respecto de la exterior; lo cual representa menor gasto de energía eléctrica para la climatización de las casas habitación y menor contaminación. Una de las grandes ventajas de los sistemas solares pasivos, frente a los activos, es su larga duración, ya que su vida útil es la misma que la del inmueble donde se instalan. Los elementos básicos utilizados por la arquitectura solar pasiva son:

*Materiales translúcidos.*- Captan la energía solar reteniendo el calor por efecto invernadero.

*Masa térmica.*-Su finalidad es almacenar energía; normalmente está integrada por elementos estructurales o volúmenes destinados para este fin.

*Elementos de protección.*-Representados por los aislamientos térmicos ya mencionados: aleros, persianas, étera.

*Elementos reflejantes.*-Producen incrementos de radiación y, en consecuencia, de temperatura en invierno y pueden actuar como elementos de protección en verano.

Al combinar algunos de estos elementos básicos, se obtienen los diversos sistemas de utilización siendo los más comunes:

*Sistemas de ganancia directa.*-Éstos, convenientemente orientados, permiten que la radiación solar penetre directamente en el espacio por calentar a través de elementos translúcidos (ventanas con vidrios transparentes) e incida sobre materiales capaces de almacenar energía, como concreto, cemento, ladrillo o inclusive agua, para que posteriormente la energía calorífica almacenada sea reflejada al espacio por calentar. Estos sistemas son de gran simplicidad y bajo costo, pero el control de su funcionamiento no es sencillo ni predecible. En la Figura 20 se muestra un ejemplo tradicional de un sistema de ganancia directa.



### Sistema de Ganancia Directa

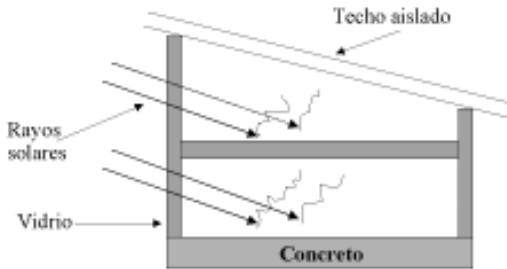


Figura 20

*Sistemas de ganancia indirecta.* -Son aquellas construcciones que cuentan con muros o techos pintados en colores oscuros, capaces de almacenar calor al recibir la radiación solar a través de elementos translúcidos, para liberarla por irradiación en días nublados o durante la noche, atenuando los diferenciales de temperatura. Estos sistemas se denominan de ganancia indirecta en virtud de que la radiación incide primero sobre una masa térmica situada entre el sol y el espacio habitable.

*Sistemas de ganancia mixta.* - Son una combinación de los de ganancia directa y los de ganancia indirecta; un invernadero es un ejemplo típico de este tipo sistemas.

## 2.2 ENERGÍA SOLAR ACTIVA DE BAJA TEMPERATURA

Estos sistemas se caracterizan por usar como elemento receptor de energía un colector o panel solar plano, su principal uso es para calentar piscinas y agua para clubes deportivos, baños públicos, hoteles y hospitales.

Los sistemas de baja temperatura están integrados por tres subsistemas principales, a saber:

### 2.2.1 SUBSISTEMA COLECTOR

Su finalidad es captar la energía solar.

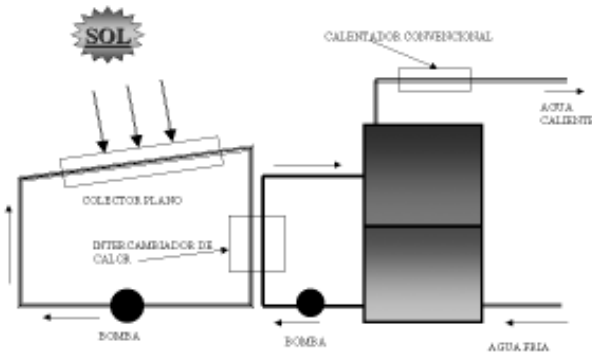
**2.2.2 SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AGUA A TRAVÉS DE TERMOTANQUES AISLADOS**

Para evitar la pérdida de calor, su función es adecuar en el tiempo la disponibilidad de energía (agua caliente) con la demanda, de tal suerte que esté disponible siempre que se le solicite.

**2.2.3 SUBSISTEMA DE DISTRIBUCIÓN O CONSUMO**

Su función; hacer llegar el agua caliente a los lugares donde se requiera.

El funcionamiento de los tres subsistemas, está condicionado por los niveles de radiación solar, los equipos, la temperatura susceptible de ser alcanzada y la demanda de agua caliente. En la Figura 21 se muestra una instalación termosolar de baja temperatura.



**CALENTADOR SOLAR PLANO DE BAJA TEMPERATURA**

Figura 21

En la figura referida, el circuito primario está compuesto por los colectores solares donde se produce el calentamiento del agua y una bomba que mantiene circulando el agua en el circuito cerrado primario. El calor ganado por el agua a través de los colectores, lo cede en el intercambiador de calor al circuito secundario. El depósito almacena el agua caliente en dicho circuito secundario, el cual está constituido por el termo tanque, con entrada de agua fría y salida de agua caliente, un calentador auxiliar convencional, que puede usar como combustible gas, diesel o combustóleo y que se usará solamente en los casos de bajos niveles de radiación solar. Se requieren además dos bombas de agua de circulación.

Descripción del subsistema colector: La característica específica de los colectores planos es que carecen de cualquier tipo de concentración de la energía incidente; captan tanto la radiación directa como la difusa y carecen de cualquier forma de seguimiento de la posición del sol a lo largo del día. Normalmente el fluido de trabajo es el agua y en algunos casos se usa aire o aceite.

Los elementos básicos de un colector plano son fundamentalmente: una cubierta transparente, una superficie captadora construida generalmente a base de tubos de cobre, hierro o aluminio, generalmente aletados para incrementar la ganancia de calor, por cuyo interior circula el fluido de trabajo (generalmente agua), aislamiento térmico, carcasa, juntas y selladores.

*Superficie captadora.* Su función es la de absorber en la forma más eficiente posible la radiación solar y transformarla en energía térmica utilizable mediante su transferencia al fluido de trabajo. La superficie o placa captadora debe presentar una alta absorbencia de la radiación solar y una baja emitancia. Estas superficies se denominan frecuentemente selectivas y su función es aumentar la ganancia de calor y reducir las pérdidas térmicas en el interior del colector.

La placa captadora o absorbedora, como se mencionó, se fabrica normalmente de material metálico, las más usadas son de acero o cobre. Esta última presenta excelentes características térmicas, pero su precio es muy elevado. También se fabrican placas de aluminio y de acero inoxidable, estas últimas con excelentes cualidades de funcionamiento y durabilidad.

El recubrimiento superficial de las placas es de gran importancia en el comportamiento del colector y, adicionalmente, debe ser muy resistente a la degradación originada fundamentalmente por la radiación ultravioleta, altas temperaturas y humedad.

A fin de lograr una mayor transferencia de calor, las placas absorbedoras se diseñan como placas conformadas y soldadas generalmente de acero y tubos aletados de cobre.

*Cubierta transparente.* Para reducir las pérdidas, proteger de la intemperie la placa captadora o absorbedora y crear el efecto invernadero, se coloca sobre la placa una superficie transparente.

Aunque se han llegado a utilizar colectores con más de una cubierta transparente de material plástico, lo más común es usar una superficie única de vidrio, a pesar de que las cubiertas de plástico transparentes son menos frágiles, más ligeras y más económicas. Sin embargo, sufren rápidamente un gran envejecimiento por su exposición directa a la radiación solar.

La utilización de dos cubiertas mejora el rendimiento, pero su costo es superior y complican la configuración del colector aumentando su peso. Este incremento de rendimiento no compensa los inconvenientes antes mencionados y la solución normal es la cubierta única.

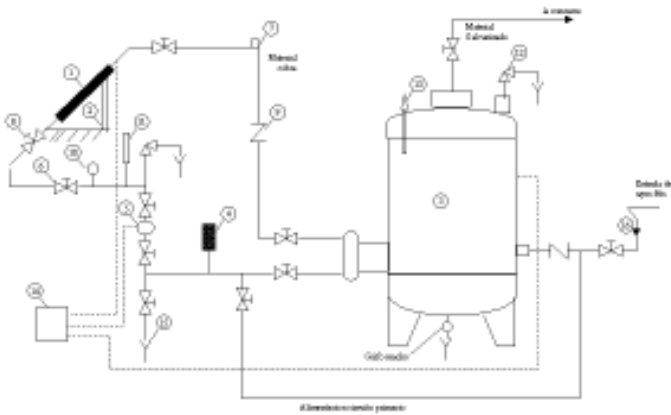
*Aislamiento térmico.* -El colector plano debe incorporar materiales aislantes tanto en el fondo del colector bajo la superficie absorbente, así como en las paredes laterales del colector, con el fin de reducir las pérdidas de calor desde el absorbedor hacia la carcasa. Para este propósito los materiales más usados son la fibra de vidrio, la espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido.

Cualquiera que sea el material seleccionado, debe tener, además de una baja conductividad térmica, un coeficiente de dilatación compatible con los demás componentes del panel solar y ser resistente a la temperatura.

*Carcasa.* -Es la cubierta exterior que aloja el resto de los componentes del colector, dándole la rigidez y estanqueidad necesarias para el conjunto. Normalmente las carcasas son metálicas y sólo en algunas expresiones se fabrican de plástico. En ambos casos, la carcasa debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Debe tener rigidez y resistencia estructural que asegure su estabilidad dimensional
- Estanqueidad
- Resistencia a la intemperie.

Existen otros elementos que no se describen en el presente trabajo, y son válvulas, bombas, vasos de expansión y llaves de purga; sin embargo, en la Figura 22 se muestra un diagrama de detalle de un colector solar plano para alimentación de un sistema de agua caliente sanitaria.



N°	Material	8	Válvula de corte
1	Colectores	9	Válvula alirratorno
2	Sopertes	10	Manómetro
3	Acumuladores	11	Termómetro
4	Vaso expansión	12	Válvula seguridad
5	Bomba	13	Resistencia eléctrica
6	Válvula recirculación	14	Control diferencial
7	Purgador	15	Válvula de vaciado

Figura 22

*Aplicaciones.* -La energía termosolar de baja temperatura tiene su más frecuente aplicación para sistemas de agua caliente sanitaria para casas habitación, hoteles restaurantes, clubes deportivos, baños públicos y piscinas.

Excepcionalmente estos sistemas se usan también en:

- Calefacción en el sector doméstico o de servicios
- Agricultura (invernaderos y silos de secado de granos)
- Industria (precalentamiento de fluidos y acondicionamiento de naves industriales o comerciales)

*Mantenimiento.* -En este tipo de sistemas, el mantenimiento estará en función del tipo de agua de que se disponga; fundamentalmente, en el caso de aguas duras se recomiendan intervalos de limpieza en el intercambiador de calor de 24 a 36 meses y en el caso de aguas blandas de 48 a 60 meses.

Para de tener una idea del mercado que se puede atacar con colectores solares planos para calentamiento de agua sanitaria solamente, del Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público, 1988-1995 publicado en el Balance Nacional de Energía 1995 se desprende el siguiente cuadro:

Consumo nacional de energéticos en el sector residencial (Peta calorías)						
Año	Leña	Gas LP	Kerosinas	Gas Natural	Electricidad	Total
1988	56.667	50.275	4.927	7.997	14.471	134.337
1990	57.336	63.500	2.404	9.002	17.542	149.784
1992	58.026	67.965	1.941	9.943	20.684	158.559
1994	58.762	75.423	0.997	9.578	23.891	168.651
1995	59.115	75.730	1.031	8.293	24.476	168.645
%						
88-95	4.30	50.60	-79.00	3.70	69.14	25.50
%						
Anual	0.61	7.22	-11.28	0.53	9.87	3.64

De la tabla anterior se desprende, al observar las tendencias, que tanto la electricidad como el gas LP muestran una dinámica de crecimiento del 8%, lo que representa que su consumo se duplica cada 10 años. La leña y el gas natural tienen un modesto crecimiento en el rango del 1%, sin embargo, con las obras de infraestructura en redes de distribución de gas natural que se están licitando en todo el territorio nacional, es de esperarse un incremento súbito en el consumo de este combustible, aparejado a una reducción proporcional en el consumo de gas LP.

En virtud de lo anterior, la distribución porcentual del consumo de energéticos en el sector residencial para 1995 que como sigue:

Leña	35.0
Gas LP	44.9
Keroseno	0.6
Gas Natural	4.9
Electricidad	14.6
Total	100.0

El gas LP y la leña son los principales energéticos del sector residencial, los cuales son usados principalmente en la cocción de alimentos y en el calentamiento de agua.

La zona metropolitana del Valle de México es, sin duda, una de las de mayor consumo a nivel mundial de gas LP, con más de 2 millones de toneladas por año. En la siguiente tabla se muestran los consumos de este energético por sector para 1995.

<b>Sector</b>	<b>Miles Ton/año</b>	<b>%</b>
Doméstico	1,640	76.78
Comercial	199	9.31
Industrial	72	3.37
Agrícola	156	7.30
Automotriz	69	3.24
Total	2,136	00.00

En términos generales, el consumo medio por cada una de las cuatro millones de viviendas que en la zona metropolitana del Distrito Federal cuentan con servicio de gas LP es de 410 Kg por año, equivalente a 1.1233 Kg./día. Considerando 4.5 habitantes por vivienda en la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM), el índice de consumo de gas doméstico por habitante es de 0.250 kg/habitante/día. Se puede considerar, en términos generales, que la mitad del consumo de gas se usa para cocinar, y la otra mitad para calentar agua.

En 1995, las emisiones de contaminantes a la atmósfera atribuidas solamente al uso de gas LP para calentamiento de agua según el Instituto de Ingeniería de la UNAM, fueron de 655,000 toneladas de bióxido de carbono; 1,790 toneladas de óxidos de nitrógeno, 380 toneladas de monóxido de carbono y 42 toneladas de metano.

Con miras a reducir al máximo las emisiones de contaminantes atribuibles a la quema de gas LP para calentamiento de agua, es factible sustituir este combustible por calentadores solares planos, sobre la base de dos metros cuadrados por vivienda, en vez de llevar a cabo las cuantiosas inversiones en obras de infraestructura en el Distrito Federal para la sustitución de gas LP por gas natural cuya combustión, aunque en menor grado, también representa significativas emisiones de contaminantes a la atmósfera.

## **2.3 ENERGÍA SOLAR DE MEDIA TEMPERATURA**

La tecnología solar de media temperatura se destina a aplicaciones que requieren temperaturas superiores a los 100 ° C. Los colectores solares planos convencionales, a partir de temperaturas de 80 ° C, presentan rendimientos prácticamente nulos y cuando se pretende generar vapor entre 100 y 250 ° C a través de energía termosolar, se debe acudir a otro tipo de elementos de captación.

### **2.3.1 COLECTORES DE VACÍO**

Como solución intermedia entre los colectores planos y los de media temperatura, existen los colectores de vacío que permiten alcanzar temperaturas de hasta 120 ° C. Normalmente estos colectores consisten en una superficie de captación formada por una serie de tubos con aletas, recubiertos de una superficie selectiva y circulando en su interior el fluido de trabajo.

La superficie de captación antes citada va protegida por una cubierta transparente que forma con ella una cámara en la que se ha hecho el vacío. De esta forma se evita la convección y las pérdidas correspondientes, con lo cual se puede alcanzar la temperatura mencionada de 120 ° C, suficiente para la generación de vapor.

### **2.3.2 COLECTORES DE CONCENTRACIÓN**

Para lograr mayores temperaturas es imprescindible concentrar la radiación solar. Existen procedimientos ópticos con dispositivos de lentes pero son costosos y únicamente se utilizan en laboratorios, para fines de investigación y desarrollo.

Los concentradores más desarrollados en la actualidad son los de reflexión mediante espejos y que para este rango de temperaturas corresponde a concentradores lineales con superficie reflexiva cilíndrico-parabólica.

Básicamente, el colector consiste en un espejo cilíndrico-parabólico, que refleja toda la radiación solar recibida, sobre un tubo generalmente de vidrio o de cobre dispuesto a lo largo de la línea focal del espejo en cuyo interior se encuentra la superficie absorbente en contacto con el fluido de trabajo. Esta disposición del absorbedor y el fluido de trabajo tiene como propósito reducir las pérdidas por convección.



Con objeto de aumentar el tiempo de duración de los espejos, se construyen de vidrio plateado o de metales especulares. En este último caso, los más usados son el aluminio y el acero inoxidable.

A fin de que en todo momento el resultado de la reflexión incida sobre el absorbedor es común que se use un dispositivo de seguimiento de la posición del sol; este, presenta una cierta complicación técnica, ya que consiste en un servomotor accionado por sensores que hacen girar los espejos, manteniéndolos siempre en dirección del sol.

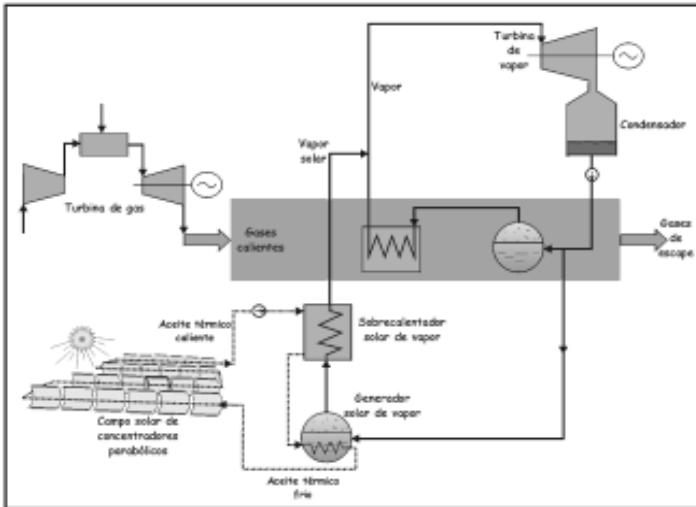
Los subsistemas con que deben contar este tipo de instalaciones son: capacidad de almacenamiento suficiente para el fluido de trabajo así como diseño para soportar las temperaturas de diseño, generador de vapor, sistema de distribución de los espejos parabólicos y sistema de control.

Hasta la fecha las aplicaciones más usuales de instalaciones de media temperatura consisten en la producción de vapor para procesos industriales incluyendo la generación de energía eléctrica así como desalinización de agua de mar y refrigeración. En la Figura 23 se muestra un colector cilíndrico parabólico.



Figura 23

Esta aplicación de la energía termosolar, con base en colectores cilíndrico-parabólicos cada día será más frecuente; de hecho, Comisión Federal de Electricidad espera lanzar su primer concurso internacional para la producción de energía eléctrica en la modalidad de productor externo de energía el primer semestre del 2002 de un ciclo combinado que tenga incorporado un generador de vapor solar. Se espera que la parte solar aporte el vapor suficiente para obtener entre de 40 y 50 MW adicionales en la turbina de



**Ciclo Combinado Solar**

Figura 24

vapor. En la Figura 24 se aprecia un esquema con tecnología ***Ciclo Combinado Solar***.

**2.4 ENERGÍA SOLAR DE ALTA TEMPERATURA**

Para aplicaciones que requieren de temperaturas superiores a 250 °C, fundamentalmente para generar energía eléctrica, es preciso recurrir a otras tecnologías que logran una mayor concentración de la radiación solar mediante el seguimiento en dos ejes de la posición del sol. Con este tipo de sistemas se pueden lograr temperaturas del orden de los 2000 °C Para este sistema. Los sistemas de concentración más comunes son:

*Paraboloïdes* - Formados por espejos parabólicos de revolución, en cuyo foco se dispone el receptor solar y en el que se calienta el fluido de trabajo.

*Centrales tipo torre* - Formados por un campo de espejos orientados (helióstatos) que reflejan la radiación sobre una caldera independiente y situada en lo alto de una torre central. En las Figuras 25 y 26 se muestran un concentrador puntual parabólico y una central solar tipo torre, respectivamente.



Figura 25

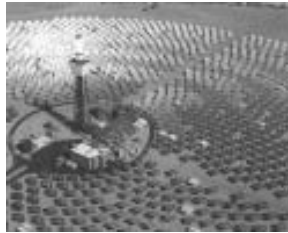


Figura 26

#### **2.4.1 CONSIDERACIONES ECOLÓGICAS**

La generación de energía, térmica directa del sol, sin que exista un proceso de combustión supone, desde el punto de vista ambiental, un procedimiento muy favorable, por su limpieza y nulo impacto sobre el medio ambiente, toda vez que la energía solar aprovechada evita la incineración de combustibles fósiles y, por tanto, la emisión al ambiente de partículas suspendidas, bióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre.

Su utilización es posible y suele tener lugar en zonas densamente pobladas en las que el problema de la calidad del aire es en verdad preocupante; además, su utilización, en la medida que se evita el uso de otros combustibles, suprime los impactos originados por ellos en su extracción, transformación, transporte y combustión.

Lo anterior incide positivamente en el agua, el suelo, la atmósfera, la flora, la fauna etc. Su utilización beneficia directamente al usuario, ya que es un procedimiento limpio y silencioso.



### 3. ENERGÍA EÓLICA

El aprovechamiento del viento como fuerza motriz es sin duda la manifestación más antigua de la energía, ya que desde hace 5,000 años, en el antiguo Egipto era usada para navegar a lo largo del Río Nilo. Los molinos de viento tradicionales han sido usados en México desde hace muchos años, básicamente para fines de irrigación. Esta clase de energía cinética aún subsiste en el mundo y actualmente está cobrando mayor importancia, tanto en países desarrollados como en aquéllos en vías de desarrollo.

El viento como tal es una manifestación energética de naturaleza aleatoria, ya que su velocidad, dirección y presencia varía con regiones geográficas, horas del día, meses del año y altura de los generadores de viento. Esta es la principal razón por la cual no es recomendable usar esta fuente energética en forma única para la alimentación de cargas remotas. Por lo tanto, será necesario aprovechar la energía eólica cuando se encuentre disponible, ya sea almacenándola en bancos de baterías o bien entregándola a la red de distribución de la empresa suministradora.

En México existen importantes manifestaciones eólicas en áreas geográficas puntuales entre las que destacan, por su importancia, los estados de Oaxaca, Hidalgo, Zacatecas, Guerrero y la península de Baja California.

Los nuevos generadores acoplados a las turbinas de viento en la actualidad son diseñados de tal forma que se elimina la necesidad de complejos

mecanismos de engranes con lo que se logra un abatimiento significativo en costo y peso.

Desde el punto de vista ambiental, el viento representa una fuente de energía extremadamente limpia y sustentable, ya que el único impacto ambiental negativo que se le puede atribuir es ruido y muerte de aves que chocan con las aspas del rotor. Sin embargo, se está trabajando en nuevos diseños de generadores eólicos con menores niveles de ruido y con aspas más visibles para los pájaros.

Como se refirió en el punto número 1, en los sistemas híbridos que operan en el país, la mayoría cuenta con generadores eólicos. En adición a lo anterior, en 1994 se construyó la primera central eólica en el estado de Oaxaca, la cual tiene las siguientes características:

- 7 Aerogeneradores de 225 kW cada uno
- 60 m de separación entre aerogeneradores
- Diámetro de las aspas 27 m
- Torres tubulares de 31.5 m de altura
- Velocidad mínima de operación: 5 m/seg
- Promedio de velocidad en Ventosa: 7 m/seg
- Velocidad para máxima potencia: 15 m/seg
- Tiempo de construcción de la central de enero a agosto de 1994
- Energía generada en los primeros 6 meses: 4 GWH
- Voltaje de generación: 480 volts
- La energía generada se descarga a una red de distribución de CFE de 13.8 KV
- En los primeros seis meses de operación se han ahorrado 10,000 barriles de petróleo
- En los primeros seis meses de operación se han dejado de emitir a la atmósfera 2,000 toneladas de bióxido de carbono.

### **3.1 POTENCIAL EÓLICO EN MÉXICO**

En la actualidad, en México existen solamente mediciones puntuales del potencial eólico del país, susceptible de ser aprovechado para la generación eléctrica. Estas mediciones provienen de pequeñas redes anemométricas que han confirmado la existencia de manifestaciones eólicas aprovechables, tanto desde el punto de vista técnico como económico, en las siguientes regiones:

### **3.1.1 OAXACA (ISTMO DE TEHUANTEPEC)**

Esta región cubre un área aproximada de 2,000 kilómetros cuadrados en la que, debido a fenómenos monzónicos entre los golfos de México y de Tehuantepec originados por corrientes marinas calientes que dan lugar a gradientes térmicos y de presión, causando la presencia de fuertes vientos prácticamente constantes de octubre a abril. En esta región el potencial eólico es de 3,000 MW y los factores de carga anuales esperados son del orden del 60%. Esta aseveración ya fue confirmada con los seis primeros meses de operación de la Central Eolo eléctrica de la Venta en los que se obtuvo un factor de planta real de 57.98%.

### **3.1.2 PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA**

Los habitantes de esta región están muy familiarizados con el *coromuel*, que es un viento constante prácticamente a lo largo de todo el año que sopla del mar a tierra firme. El origen del vocablo “coromuel”, asociado al viento, proviene del pirata Cromwell, quien en el siglo XVII aprovechaba los vientos mencionados para asaltar las poblaciones costeras de la península de Baja California. Esto da una idea de la presencia, desde hace más de dos siglos, de una importante manifestación eólica.

En la franja comprendida entre la Sierra de Juárez y la de San Pedro Mártir, en Ensenada, La Rumorosa, Rosarito y en general en toda la península las manifestaciones eólicas pueden totalizar aproximadamente 500 MW, que serían de gran utilidad para el desarrollo industrial de la misma, toda vez que ésta es la única región geográfica del país que no está interconectada al sistema eléctrico nacional e inclusive ni la península está interconectada entre sí, ya que existe el sistema Tijuana Mexicali al norte del paralelo 28 y el sistema eléctrico de La Paz, en Baja California Sur.

### **3.1.3 PENÍNSULA DE YUCATÁN**

La exposición de la península a los vientos alisios de primavera y de verano, la presencia de nortes en la época invernal, las permanentes e intensas corrientes marinas entre Playa del Carmen y la Isla de Cozumel representan un importante potencial eólico.

### **3.1.4 REGIÓN CENTRO NORTE**

Esta región cubre desde los estados de Durango y Zacatecas hasta Hidalgo y Tlaxcala. Es común referirse a la capital de Hidalgo, Pachuca, como la bella Airosa. Particularmente, en el estado de Zacatecas, en el área conoci-

da como el Cerro de la Virgen, existe también un potencial eólico. En toda esta región es posible lograr un potencial del orden de los 4,000 MW.

### 3.1.5 LOS LITORALES

México cuenta con 10,000 Km de litoral, en los cuales también existen importantes manifestaciones eólicas susceptibles de aprovecharse para la generación eléctrica, para moler granos y para bombear agua.

En resumen, a pesar de la falta de información confiable sobre el recurso eólico de México es factible, en los próximos 20 años, lograr una capacidad instalada de 5,000 MW, mismos que con un factor de planta promedio anual de 40% pueden generar 17,520 GWH anuales, los cuales servirían para dejar de quemar 43.8 millones de barriles de petróleo y no se emitirían 8.76 toneladas de bióxido de carbono a la atmósfera.

### 3.2 ENERGÍA EÓLICA EN EL MUNDO

Sin lugar a dudas, Estados Unidos de Norteamérica es el país que más aprovecha sus manifestaciones eólicas en la actualidad. Baste decir que solamente la empresa Pacific Gas & Electric en San Francisco, California, tiene funcionando desde la década de los 80's 700 MW en generación eólica, en gran medida debido a que las disposiciones legales vigentes en California, en materia ambiental, son más rigurosas que la norma nacional de la Environmental Protection Agency (EPA), privilegiándose el uso de fuentes renovables de energía. Al inicio de la década de los 90's, la generación eólica en Estados Unidos ascendió a 1,600 MWH y se espera que para finales de siglo se tenga 10 veces este valor.

Por lo que se refiere a la comunidad europea, los países que más énfasis han puesto en la generación eólica son:

<b>País</b>	<b>Capacidad Instalada (MW)</b>
Dinamarca	360
Alemania	55
Holanda	55
España	16
Reino Unido	10
Grecia	5
Bélgica	2
Portugal	2



En las Figuras 27 y 28 se muestran fotografías de dos generadores típicos usados en el parque eólico de Altamont Pass, en California, en el cual existen más de 7,300 generadores de viento operando, lo que representa la mayor concentración de molinos del mundo. Los generadores eólicos usados en dicho parque, representan prácticamente todos los diseños y fabricantes de aerogeneradores en el mundo.



Figura 27



Figura 28

### 3.3 DATOS BÁSICOS PARA EL CÁLCULO DE GENERACIÓN EÓLICA

Para el cálculo de una instalación eólica, independientemente del número de aerogeneradores instalados, del tamaño y potencia de los mismos, se requiere la siguiente información:

- a) Potencial eólico y características del viento en el sitio seleccionado
- b) Superficie disponible para la instalación de los aerogeneradores, así como vías de acceso al sitio
- c) Características de la red eléctrica a la que se pretenda descargar la generación eólica, así como distancia de los aerogeneradores a la red eléctrica más próxima

- d) En el caso de sistemas aislados, no es factible depender exclusivamente de la generación eólica debido a la naturaleza aleatoria de los vientos; en virtud de ello, se requiere conocer las características de otras fuentes convencionales y no convencionales que integran los sistemas híbridos y a los cuales se acopla la generación eólica.

### **3.4 INFLUENCIA DE OBSTÁCULOS TOPOGRÁFICOS SOBRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO**

Existen aspectos topográficos y orográficos que afectan considerablemente el potencial eólico en sitios determinados, debido fundamentalmente a la altura de la turbina eólica respecto del punto en el que se llevaron a cabo las mediciones anemométricas en las que se basó el proyecto.

La orografía y la topografía afectan en forma importante, debido al diferente nivel de rozamiento del aire sobre el terreno, produciéndose un gradiente de velocidades que suele verse afectado por la compresión que sufre el viento en algunos lugares para pasar ciertos obstáculos que encuentra en su recorrido, incrementándose con ello notablemente la velocidad.

La altura de montaje del conjunto turbina-generator tiene una gran importancia ya que, por una parte, puede captar una mayor velocidad de viento, debido al gradiente de velocidades y, por otra, la corriente de aire conforma un flujo más laminar con coeficiente de rozamiento menor, alejándose de las zonas de turbulencia. Por esta razón, en Europa actualmente se tiende a la instalación de parques eólicos en el mar, conocidos como *Offshore*, a poca distancia de la costa.

La variación de la velocidad del viento respecto de la altura de montaje del aerogenerador está dada por la siguiente expresión:

$$V = V_0 (H/H_0)^n$$

Donde:

V: es la velocidad del viento que debe existir, a la altura H respecto al nivel del suelo

V<sub>0</sub>: es la velocidad de viento registrada por un anemómetro

H: es la altura de montaje del aerogenerador y a la que se desea estimar la velocidad del viento

H<sub>0</sub>: es la altura de montaje del anemómetro que normalmente es de 10 m

n: representa el coeficiente de rugosidad del sitio de instalación. En la tabla siguiente se muestran valores típicos de n para diferentes tipos de terreno.

<b>Tipo de terreno</b>	<b>n</b>
Liso y terso (mar, arena y nieve)	0.10 a 0.13
Moderadamente rugoso (hierba corta, trigales y otros cultivos de cereales)	0.13 a 0.20
Rugoso (bosques, áreas suburbanas)	0.20 a 0.27
Muy rugoso (áreas urbanas, edificios altos)	0.27 a 0.40

Los valores de n se han determinado empíricamente y debido a que éstos pueden variar considerablemente de un punto a otro dentro del mismo sitio del parque eólico, es recomendable emplear algunas torres con anemómetros instalados a distintas alturas, a fin de conocer en forma real el gradiente de variaciones de la velocidad del viento a las diferentes alturas de montaje y obtener un valor medio para todo el sitio.

La potencia eólica disponible en un sitio determinado está en función de la velocidad del viento, del área de captación del rotor y de la densidad del aire, y se expresa como sigue:

$$P = (1/2) * G * A * V^3$$

Donde:

P: Potencia en Watts

G: Densidad del aire en el lugar de la medición en kg/m<sup>3</sup>

A: Área transversal a la dirección del viento, formada por la rotación del rotor en m<sup>2</sup>

V: Velocidad del viento que incide sobre el rotor en m/s

La energía capturada en un generador eólico es proporcional al área descrita por su rotor y la energía anual que es posible generar con cada metro cuadrado de rotor está dada por:

$$E = 2.5 (V)^3$$

Donde:

V: Velocidad media anual en un emplazamiento determinado

E: Energía capturada anualmente por unidad de superficie del rotor (kWh/m<sup>2</sup> x año).

### **3.5 CRITERIOS DE DISEÑO**

Un parque eólico conectado a la red de distribución de media tensión de una empresa suministradora de energía eléctrica (en el caso de México la Comisión Federal de Electricidad o Luz y Fuerza del Centro), se configura bajo las siguientes bases:

Instalación de varios aerogeneradores de igual dimensión y potencia (esta condición no es estrictamente necesaria, pero es la más deseable). Con voltaje de generación de 480 volts y con potencias que pueden variar entre 50 y 500 kW, dependiendo de las características de velocidad y estacionalidad del viento. Estos generadores eólicos se conectan a través de transformadores tipo poste que elevan el voltaje de 480 a 13,800, 23,000 o 34,500 volts y se conectan a circuitos de distribución que recorren la totalidad del parque eólico y eventualmente se sincronizan a la red de distribución de la empresa suministradora.

De acuerdo con lo que establece la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en sus artículos 36 y 36 Bis, los parques eólicos mencionados pueden ser instalados por particulares, siempre y cuando cumplan con los requisitos establecido tanto en la ley citada como en su reglamento y bajo las figuras jurídicas autorizadas para el efecto a saber:

- **Productor externo.**- En este caso, la totalidad de la energía eléctrica generada por el parque eólico se entrega a CFE, para lo cual es necesario convenir previamente las condiciones de esta entrega que, dicho sea de paso, también están previstas en la ley de la materia.
- **Autoabastecedor.**- Esta figura contempla la satisfacción de las necesidades de potencia y energía de los particulares y el concepto de autoabastecimiento puede ser total o parcial. En este último caso, el déficit de potencia y energía se adquiere de la suministradora. Conviene señalar que existe la posibilidad que en caso de autoabastecimiento se pudieran tener excedentes susceptibles de ser aprovechados en otras instalaciones del propietario del parque eólico en algún sitio distante del parque, usando la infraestructura de distribución y/o transmisión de la empresa eléctrica, previa celebración del convenio de porteo de energía correspondiente.
- **Pequeño productor.**- Esta figura se refiere fundamentalmente a comunidades rurales alejadas de las redes de distribución de CFE o de LyF y que pueden constituir una sociedad cooperativa para la

alimentación eléctrica de pequeñas comunidades rurales a través de parques eólicos y otras fuentes renovables de energía.

En la Figura 29 se muestra un ejemplo típico de un parque eólico conectado a la red eléctrica de la *utility* en baja, media y alta tensión.

### 3.6 GENERADORES EÓLICOS

Los aerogeneradores conectados a la red suelen ser de potencias bajas y medias, los más pequeños van de 5 kW y los de mayor capacidad, que

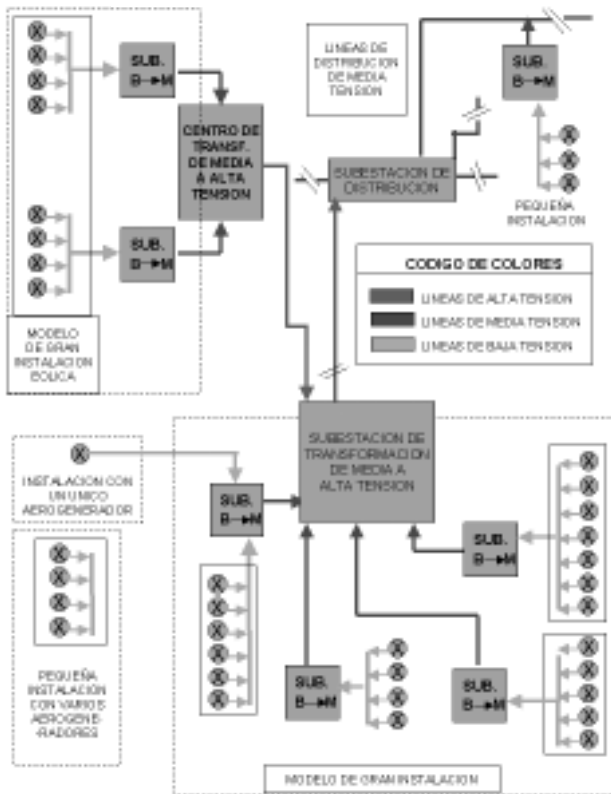


Figura 29

actualmente se encuentran en fase de demostración, son de 750 y 1,000 kW cada uno.

En la Figura 30 se muestran los tipos de generadores eólicos que se fabrican en la actualidad, independientemente de su tamaño físico y su capacidad en kW.

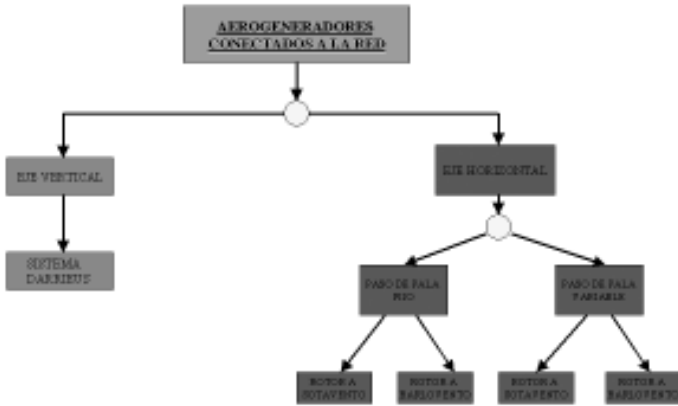


Figura 30

Si bien los generadores eólicos más comunes son los de eje horizontal, es conveniente mencionar las diferencias más importantes entre éstos y los de eje vertical. Probablemente las ventajas más significativas son de tipo estructural, debido a la forma de sujeción de las palas; además, los aerogeneradores de eje vertical no requieren de orientación alguna, debido a la simetría de las palas que permite aprovechar vientos de cualquier dirección, así como instalar el generador en tierra con una menor complejidad a la hora de llevar a cabo los trabajos de mantenimiento rutinarios. En la Figura 28 se muestra un aerogenerador de eje vertical del tipo *Darrieus*.

**3.6.1 GENERADORES DE EJE VERTICAL**

El mayor desarrollo en generadores de eje vertical lo ha conseguido el tipo *Darrieus* mostrado en la figura anterior, debido a las características aerodinámicas de las palas, que permiten el aprovechamiento de velocidades de viento elevadas dentro de una banda muy amplia, sin que se requieran mecanismos de regulación y control muy sofisticados, ya que cada tamaño de máquina tiene un límite de potencia definido por las palas de

paso fijo y el mecanismo de transmisión de la energía cinética a la flecha del generador.

Las principales desventajas de los aerogeneradores de eje vertical respecto de los de eje horizontal son:

- Requieren de una motorización, ya que los perfiles aerodinámicos y la simetría de las palas no permiten el auto arranque.
- Para emplazamientos que se encuentren entre 1,800 a 2,500 kWh/kW por año, se ha comprobado que a igual potencia instalada, entre unode eje vertical y un modelo de eje horizontal, el primero genera aproximadamente la mitad de energía eléctrica que el segundo. Esta ha sido una de las principales razones por las que normalmente el mercado de los generadores eólicos demanda un menor número de máquinas de eje vertical.

### **3.6.2 GENERADORES DE EJE HORIZONTAL**

Independientemente de la clasificación de generadores eólicos mostrada en la figura 30, es importante destacar que existen dos tipos de aeroturbinas, según la velocidad de giro de los rotores. Las rápidas, que en términos generales son las que se sincronizan a la red de distribución de las empresas suministradoras y que de hecho reciben el nombre de aerogeneradores y las lentas, que con frecuencia se denominan aeroturbinas, que son usadas en aplicaciones de suministro a cargas remotas aisladas, como el caso de los sistemas híbridos ya comentados.

Los generadores de eje horizontal, como el mostrado en la Figura 31, son fundamentalmente máquinas con un rotor giratorio, cuyo movimiento es producido por le energía cinética del viento al incidir éste sobre las palas (generalmente 3) de que consta el rotor, mismas que aprovechan al máximo la velocidad del viento debido al avanzado diseño de los perfiles aerodinámico de las palas. El movimiento de rotación producido es transmitido e incrementado a través de un multiplicador de velocidad hasta el generador eléctrico. Los componentes antes referidos se instalan sobre un bastidor en la parte más alta de una torre. A continuación se describirán, en forma breve, los distintos componentes de un generador de eje horizontal.

#### **3.6.2.1 PALAS**

Son los elementos del aerogenerador sobre los que incide la energía cinética

del viento, se fabrican generalmente de fibra de vidrio y consisten en un larguero resistente y una envolvente de sección y perfil variable y aerodinámico. Se fijan a un elemento de soporte de acero llamado buje.

#### **3.6.2.1.1 AEROGENERADORES DE PASO FIJO**

Son aquéllos en los que el anclaje de las palas al buje es fijo y no admite rotación de la pala sobre su propio eje.

#### **3.6.2.1.2 AEROGENERADORES DE PASO VARIABLE**

Son aquéllos en los que el anclaje de las palas al buje permite el giro sobre su propio eje a través de rodamientos, requieren de un equipo adicional hidráulico-mecánico o eléctrico para su funcionamiento.

Son más frecuentes los aerogeneradores de paso fijo y tienen la ventaja de su simplicidad de diseño y operación. Sin embargo, los de paso variable se adaptan mejor a las cambiantes velocidades del viento.

#### **3.6.2.1.3 BUE**

Es el elemento de soporte de las palas; permiten un cierto ajuste de su paso fijo durante la instalación para optimizar la generación en cada sitio. El buje está montado sobre el eje de baja velocidad, el cual transmite el par motriz del rotor a la caja de engranes o multiplicador de velocidad.

Cuando el aerogenerador es de paso variable, el buje contiene los mecanismos que producen el giro de las palas, y cuando es de paso fijo (no permitiendo más que el ajuste inicial antes mencionado), y cuenta con frenos aerodinámicos accionados hidráulicamente, también se instalan dentro del buje unas válvulas de accionamiento.

#### **3.6.2.1.4 MULTIPLICADOR**

Normalmente de ejes paralelos o también de sistema planetario. El eje principal suele ser de acero forjado y es donde se embrida el buje. Este eje es hueco en aerogeneradores de paso fijo para pasar los conductos hidráulicos que accionan los frenos aerodinámicos y en los de paso variable, para introducir el accionamiento de las palas. El par motriz desarrollado por el multiplicador de velocidad a través del eje de salida se conecta al generador mediante un acoplamiento normalmente elástico.



### **3.6.2.1.5 GENERADOR**

Es una máquina basada en inducción electromagnética que se encarga de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Se instala en un bastidor detrás del multiplicador de velocidad y es accionado por el eje de mayor velocidad del multiplicador a través de un acoplamiento elástico. Está compuesto por dos partes fundamentales, el rotor o inductor móvil, que se encarga de generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina, y el estator o inducido fijo sobre el que se genera la corriente eléctrica aprovechable.

Los generadores pueden ser síncronos o asíncronos, siendo estos últimos los más empleados en las máquinas eólicas.

En los generadores síncronos, la conversión de la energía mecánica en eléctrica se produce a una velocidad constante llamada de sincronismo. El campo magnético es creado por las bobinas enrolladas en los polos del rotor, para lo cual, por dichas bobinas debe circular una corriente eléctrica continua. Para producir esta corriente continua pueden emplearse diferentes sistemas de excitación:

- Autoexcitación estática. La corriente proviene de la propia energía eléctrica generada previamente transformada de alterna en continua
- Excitación con diodos giratorios. Se crea una corriente alterna invertida, con polos en el estator y se rectifica por un sistema de diodos situados en el eje común.
- Excitación auxiliar. La corriente necesaria se produce mediante un generador auxiliar, que es regulado por un reóstato.

En los generadores asíncronos, dada la simplicidad, robustez y bajo costo de los clásicos motores eléctricos, éstos han empezado a usarse como generadores eléctricos. Para ello es necesario que el par mecánico comunicado al rotor produzca una velocidad de giro superior a la del excitador. Es importante que la diferencia entre las velocidades de funcionamiento y la de sincronismo sea pequeña, para reducir las pérdidas en el cobre del rotor. En muchas ocasiones es necesario corregir el bajo factor de potencia de este tipo de generadores mediante la instalación de bancos de capacitores.

### **3.6.2.1.6 BASTIDOR**

En él se montan los elementos antes descritos, descansa y es atornillado

en su base sobre un rodamiento de grandes dimensiones que soporta los esfuerzos axiales, radiales y de vuelco que actúan sobre el aerogenerador. El bastidor también se conoce como góndola y se fabrica generalmente de metal o fibra de vidrio.

El rodamiento actúa de elemento solidario entre el bastidor y la torre del aerogenerador, permitiendo el giro del bastidor para adaptar el rotor a las desviaciones de dirección del viento. Aunque existen otros sistemas de orientación, denominados molinetes o cola, la gran mayoría de las máquinas que trabajan a barlovento, sobre todo si son de cierto tamaño, emplean moto reductores.

### **3.6.2.1.7 TORRE**

Normalmente son torres tronco-cónicas o bien en forma de celosía hecha basándose en perfiles de acero laminados atornillados o soldados. Los elementos metálicos son protegidos contra la corrosión mediante un sistema de galvanizado en caliente. La torre se fija al suelo mediante una cimentación de concreto armado, diseñada tomando en cuenta los estudios de mecánica de suelos correspondientes, las velocidades mínima, media y máxima del viento, así como la altura de montaje del conjunto turbina-generador. Las cimentaciones más comunes para estos casos son pilotes o zapatas.

### **3.6.2.1.8 SISTEMA DE CONTROL**

Cada generador eólico cuenta con un microprocesador que lleva a cabo las siguientes funciones:

- Control de las variables de funcionamiento del aerogenerador, regulación de las variables, registro de incidencias, así como causas posibles que las originaron. Las funciones de verificación incluyen el diagnóstico de funcionamiento de la máquina antes y después de su operación comercial, así como las secuencias de arranque y paro definidas por la velocidad del viento.
- Comunicación con el sistema de control central de la instalación, al cual proporciona toda la información relativa a cada generador eólico. Todos los aerogeneradores deberán poder ser arrancados a control remoto a través del sistema de comunicación, desde un puesto de mando centralizado.

- Los mecanismos de control de orientación están formados por una veleta, un moto reductor de orientación, una corona de orientación frenos y sistemas de control. La orientación al viento se consigue con la lectura de direcciones del viento tomada mediante la veleta. La información conseguida es transmitida mediante el sistema de control que la integra cada cierto tiempo produciendo una orden de arranque temporizada al moto reductor de orientación, prefijándole el sentido de giro y los grados de inclinación necesarios.



Figura 31



## 4. MICROHIDROELECTRICIDAD

En la actualidad, los precios mundiales del petróleo están a la baja, debido fundamentalmente a la sobreoferta de los países árabes que integran la Organización de Países Productores y Exportadores de Petróleo (OPEP). Esta es una situación temporal, debido a que vivimos en una sociedad creciente que demanda intensivamente recursos energéticos que, en términos generales, provienen del petróleo y del carbón. Si bien este último es un recurso abundante en la naturaleza, el petróleo se agotará en el curso del siglo *xxi*.

Como ya se ha mencionado, la quema de combustibles fósiles para la generación eléctrica es altamente agresiva para el medio ambiente, por lo que es impostergable la búsqueda de fuentes alternas de energía que no presenten problemas de emisión de contaminantes a la atmósfera.

La microhidroelectricidad es considerada una fuente energética limpia, de tecnología madura y, además, una fuente renovable de energía. Cuando estos proyectos se combinan con otros relativos al suministro de agua potable a poblaciones o con los relacionados con riego agrícola, las minicentrales hidráulicas son altamente competitivas.

Las centrales con capacidad instalada de hasta 5 MW se pueden considerar como microhidráulicas. Es pertinente mencionar que en el Sector Eléctrico mexicano existe actualmente una cantidad importante de pequeñas

centrales hidroeléctricas que dejaron de operar en la década de los 70's, debido fundamentalmente a elevados costos de operación. Entre ellas, podemos citar las centrales Portezuelos I y II en el estado de Puebla, La Trinidad, Coacoyunga, San Sebastián y San Miguel Regla, en el estado de Hidalgo, cuya capacidad total instalada es del orden de los 10 MW y que en la actualidad, con los avances en materia de automatización y telecontrol, pueden ser puestas en operación fácilmente, eliminando la mayor parte de los costos de operación que son los asociados con los salarios y las prestaciones sociales de los operadores. Por lo que se refiere al Estado de México, existen sitios de los que se pueden obtener potencias hidroeléctricas de magnitudes importantes si se aprovechan algunas aguas residuales como las del Río Tula. De estos proyectos, por su importancia, se hará una mención especial.

#### **4.1 TIPOS DE MINICENTRALES**

La finalidad de una central hidroeléctrica es aprovechar un salto existente en un curso de agua, transformando la energía potencial de la masa de agua en el punto más elevado en energía eléctrica disponible en el punto más bajo, que es donde normalmente se instala la casa de máquinas de la central.

Existe una gran variedad de instalaciones para llevar a cabo esta transformación energética. Una primera clasificación es:

- Centrales de Agua fluyente
- Centrales de pie de presa
- Centrales de canal de riego agrícola

##### **4.1.1 CENTRALES DE AGUA FLUYENTE**

Se encuentran dentro de este tipo aquellos aprovechamientos que, mediante una obra de toma, captan una parte del caudal circulante por el río y lo conducen hacia la central para ser turbinado. Posteriormente este caudal se devuelve al cauce del río.

Dentro de este mismo tipo, hay muchas formas de realizar este proceso. Puede ser necesario, dependiendo del emplazamiento o sitio, la realización de las siguientes instalaciones:

Presa para almacenamiento de agua para hacerla fluir a discreción por la tubería de presión a través de la obra de toma y eventualmente ser turbinada

- Canal de derivación
- Cámara de carga
- Obra de toma
- Tubería de presión
- Casa de máquinas y equipamiento electromecánico
- Canal de descarga al río

Estas centrales se caracterizan por tener un salto útil prácticamente constante y un caudal susceptible de ser turbinado muy variable, dependiendo de la hidrología de la región, por lo que en este tipo de aprovechamientos la potencia o capacidad instalada está en proporción directa del caudal que pasa por el río.

También pertenecen a este tipo de centrales las que se sitúan en el curso del río ganando salto útil mediante la construcción de una cortina.

#### **4.1.2 CENTRALES DE PIE DE PRESA**

Se incluyen en este tipo, los aprovechamientos hidroeléctricos que tienen posibilidad de almacenar las aportaciones de un río mediante la construcción de un embalse. En este tipo de centrales se regulan los caudales de salida para ser turbinados en el momento más idóneo, que suele ser la hora pico del sistema eléctrico de la empresa suministradora. También se incluyen las centrales ubicadas en embalses construidos para otros fines, como riego agrícola o alimentación de agua potable a una determinada población. Dependiendo de la capacidad del embalse, la regulación puede ser horaria, diaria o semanal.

Las obras e instalaciones necesarias en este tipo de centrales son:

- Adaptación de las conducciones de la presa a la minicentral, o construcción de otras nuevas.
- Obra de toma, rejilla y compuerta.
- Tubería forzada hasta la central.

#### **4.1.3 CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN CANAL DE RIEGO**

##### **4.1.3.1 DESNIVEL EXISTENTE EN EL PROPIO CANAL (RÁPIDA)**

Se aprovecha mediante la instalación de una tubería forzada, paralela a la rápida, que conduce el agua hasta la central, devolviéndola posteriormente a su curso normal en el canal.

### **4.1.3.2 DESNIVEL EXISTENTE ENTRE EL CANAL Y EL CURSO DE UN RÍO CERCANO.**

La central se instala cercana al río y se turbinan las aguas excedentes en el canal.

Las obras que necesariamente se deben llevar a cabo en este tipo de centrales son:

- Toma en el canal con un vertedor de demasías, conocido también como vertedor de abanico.
- Tubería forzada.
- Casa de máquinas y equipamiento electromecánico.
- Obra de incorporación al canal o al río dependiendo del tipo de aprovechamiento.

## **4.2 CRITERIOS DE DISEÑO**

Para la realización de un aprovechamiento hidroeléctrico es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones que pueden afectar la solución óptima desde el punto de vista técnico-económico, entre la que se pueden citar las siguientes:

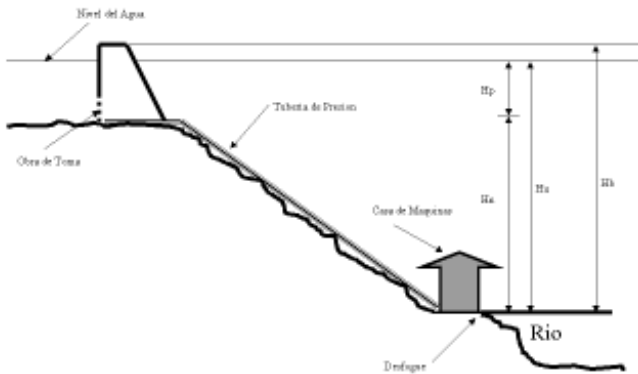
- El emplazamiento de la minicentral deberá estar tan cerca de los centros de carga como sea posible, con objeto de reducir la distancia de la transmisión, con lo cual se reducen también las pérdidas de energía y la caída de tensión.
- En virtud de que la potencia total es proporcional al salto útil, y al gasto expresado en metros cúbicos por segundo, la correcta determinación de estas dos variables es fundamental para el diseño de las instalaciones.
- El salto útil debe ser el máximo permitido por la topografía del terreno, pero dentro de los límites definidos por la viabilidad de la inversión, así como por las posibles afectaciones al medio ambiente.
- Los valores del gasto y del salto útil, como se verá más adelante, también determinan el tipo de turbina más idóneo para cada caso.
- El adecuado diseño de los elementos que constituyen la central, como: cortina, canal, cámara de carga, tubería de presión así como el equipamiento de la central, turbina, generador, bombas, válvulas, mecanismos de control, automatización, sistemas de lubricación, etc., son fundamentales para una correcta ejecución del proyecto y para su viabilidad técnico-económica.



### 4.3 DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE INSTALACIONES

#### 4.3.1 ALTURA DEL SALTO.

Para definir esta altura, es necesario considerar las siguientes definiciones (ver Figura 32)



### Corte de una central hidroeléctrica

Figura 32

- Salto bruto ( $H_b$ ). Altura existente entre el nivel del agua en el vertedero de la cortina y el nivel normal del río en el punto donde se descarga el canal turbinado (conocido también como desfogue).
- Salto útil ( $H_u$ ). Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe de la turbina.
- Salto neto ( $H_n$ ). Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones.

Las pérdidas mencionadas son debidas a la conducción por tubería forzada, embocadura de la cámara de carga, codos, reducciones, válvulas, etc. El salto neto varía con el caudal turbinado, ya que las pérdidas de carga son función del caudal circulante.

### 4.4 POTENCIA INSTANTÁNEA

La potencia disponible en una central hidroeléctrica, independientemente de su tamaño, varía en función del caudal turbinado y del salto neto.

$$P = 9.81 * Q * Hn * E$$

Donde:

P Potencia instantánea en kW

Q Caudal turbinado (gasto) m<sup>3</sup>/s

Hn Salto neto existente en metros

E Factor de eficiencia de la central que es igual al producto de los rendimientos de los diferentes equipos que intervienen en la producción de energía, es decir:

$$E = Rt * Rg * Rt$$

Siendo:

Rt Rendimiento de la turbina

Rg Rendimiento del generador

Rt Rendimiento del transformador de salida

El rendimiento de los diferentes equipos varía en función del tipo y del fabricante. Para una minicentral considerar una eficiencia global del 80% es un valor aceptable. Una vez conocida la potencia instantánea o capacidad de la central expresada en kW, es muy fácil determinar la energía generada por la central por día, mes o año, la cual estará en función del gasto susceptible de ser turbinado en cada período.

#### **4.5 TURBINAS HIDRÁULICAS**

La turbina es un elemento que aprovecha la energía cinética y potencial del agua para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje al generador, produce la energía eléctrica. En cuanto a la filosofía de funcionamiento, las turbinas se pueden clasificar en:

- Turbinas de acción
- Turbinas de reacción

La diferencia entre ambos tipos es que las primeras aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar, mientras que las segundas aprovechan, además, la presión que le resta a la corriente en el momento de contacto. Es decir, mientras que las turbinas de reacción aprovechan la altura total disponible hasta el nivel del desagüe, las de acción aprovechan sólo la altura hasta el eje de la turbina.

El tipo de turbina de acción más conocido es la Pelton, pero existen otras, como las Turgo, con inyección lateral, y la de doble impulsión o de flujo cruzado conocida como turbina Ossberger o Banki-Mitchell.

#### **4.5.1 TURBINA PELTON**

La Pelton es la turbina de acción más utilizada. Consta de un disco circular o rodete, el cual tiene montados en su periferia una especie de cucharas dobles conocidas también como cangilones.

El chorro de agua dirigido y regulado por uno o varios inyectores incide sobre los cangilones, provocando el movimiento circular de la turbina. La potencia se regula a través de los inyectores que aumentan o reducen el caudal de agua. En los paros bruscos o de emergencia es necesario usar un deflector de chorro, que lo dirige directamente hacia el desagüe, evitando así daños a la máquina. De esta forma, se puede realizar un cierre lento de los inyectores sin provocar golpes de presión en la tubería forzada.

Este tipo de turbinas es muy usado en aprovechamientos hidroeléctricos de saltos elevados y de pequeño caudal. Pueden ser de eje vertical o de eje horizontal; estas últimas son máquinas que cuentan con uno o dos inyectores, y las de eje vertical son aquellas que tienen más de dos inyectores.

#### **4.5.2 TURBINA FRANCIS**

Dentro de las turbinas de reacción, la Francis se caracteriza porque recibe el flujo de agua en dirección radial, orientándolo hacia la salida en dirección axial. Este tipo de turbina esta compuesto por:

- Un rodete formado por una corona de paletas fijas, torsionadas de forma que reciben el agua en dirección radial y la orientan axialmente.
- Una cámara de entrada, que puede ser abierta o cerrada en forma espiral para dar una componente radial al flujo de agua.
- Un tubo de aspiración o de salida de agua, que puede ser recto o acodado, y se encarga de mantener la diferencia de presiones necesarias para el buen funcionamiento de la turbina.
- La turbina Francis se adapta muy bien para distintos saltos y caudales.

#### **4.5.3 TURBINAS KAPLAN Y DE HÉLICE**

Una instalación con turbina de hélice se compone básicamente de una

cámara de entrada que puede ser abierta o cerrada, un distribuidor fijo, un rodete con 4 o 5 palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de aspiración. Otra variante de las turbinas de hélice tiene un distribuidor regulable y un rodete de palas fijas. Por lo que se refiere a las turbinas Kaplan y semi Kaplan, son variantes de las de hélice con diferentes grados de regulación.

Este tipo de turbinas se usan generalmente para saltos pequeños y caudales variables. La variación admitida en el salto es del 60% al 140% del diseño, y en el caudal del 40% al 105% del caudal nominal. La instalación de este tipo de turbinas, suele ser con eje vertical en cámara abierta o cerrada, con eje horizontal, y las tipo bulbo que se instalan con una ligera inclinación en la corriente de agua. Estas últimas son las más recomendables para el caso de pequeños esquemas de generación hidroeléctrica, ya que requieren poca obra civil aunque por otra parte, la operación y mantenimiento de las instalaciones son más complicadas.

#### **4.5.4 COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE TURBINAS. RANGOS DE UTILIZACIÓN Y RENDIMIENTOS**

Cada turbina tiene un rango de posible utilización, en función del salto y caudal. Así por ejemplo, para saltos pequeños y caudales variables es adecuada la turbina Kaplan. Si el salto es más elevado y las variaciones de caudal son más moderadas, se puede utilizar la turbina Francis. Para grandes saltos, independientemente de la variación de caudal, la turbina más adecuada será la Pelton.

#### **4.6 PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS SUSCEPTIBLES DE SER INSTALADAS EN EL RAMAL NORTE DEL ACUEDUCTO MÉXICO-LERMA**

Parte del caudal de agua que se suministra al Distrito Federal y su área conurbada proviene de la zona alta del valle de Toluca, donde afloran manantiales que dan origen al Río Lerma. Actualmente, esta agua proviene de manantiales y pozos perforados, la cual es conducida al Distrito Federal por medio de un acueducto de las siguientes características:

- Un tramo de 22 Km. En la margen oriental de la laguna de Lerma con diámetro variable según las aportaciones que va captando a lo largo de su recorrido.
- La conducción, a través de la Sierra de las Cruces se, hace por

medio de un túnel de 14.334 kilómetros de longitud, con un diámetro de 3.20 m y pendiente de 0.00067, conocido como Túnel de Atarasquillo.

- A la salida del túnel, ya en el Valle de México, a una elevación de 2,252 m sobre el nivel del mar se inicia el acueducto Ramal-Norte, que lleva el agua hasta los tanques de regulación y distribución Dolores, que tienen una elevación de 2,280 msnm.

#### **4.6.1 DESNIVEL DISPONIBLE**

El mayor desnivel del acueducto México-Lerma en su ramal norte es de 227 m y es susceptible de ser aprovechado para la generación de energía eléctrica; sin embargo, es pertinente mencionar que las condiciones topográficas y geológicas del terreno no permiten tener una sola caída para el aprovechamiento del caudal, por lo que es necesario localizar, a lo largo del trazo del acueducto, caídas naturales en donde se pueda instalar una minicentral hidroeléctrica. Los sitios más idóneos en la dirección aguas arriba aguas abajo son:

<b>Caída</b>	<b>Desnivel en metros</b>
San Bartolito	89
El Borracho	46
Las Palmas	106
San Joaquín	28

#### **4.6.2 LOCALIZACIÓN**

A la salida del túnel de Atarasquillo, el acueducto se divide en dos ramales, el sur y el norte, mediante una trifurcación localizada en un sitio conocido como El Venado. Las obras hidráulicas y civiles requeridas para poner en marcha estas centrales se hicieron en la década de los 70's; sin embargo, nunca se construyeron las casas de maquinas y mucho menos se equiparon. Las tres primeras caídas se localizan en el Municipio de Huixquilucan en el Estado de México, y la cuarta en la Delegación Miguel Hidalgo del Distrito Federal.

#### **4.6.3 CANTIDAD DE AGUA DISPONIBLE**

Actualmente llegan en promedio 12 m<sup>3</sup>/s por el túnel de Atarasquillo, de los cuales 5.5. m<sup>3</sup>/s se derivan hacia el acueducto Ramal Norte, que es

donde se encuentran las caídas. Antes de la primer caída aprovechable, San Bartolito, se derivan hacia el tanque de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) del Estado de México 2.25 m<sup>3</sup>/s para el suministro de agua en parte de dicha entidad federativa, quedando 3.25 m<sup>3</sup>/s para las caídas San Bartolito y El Borracho. Entre el Borracho y Las Palmas se extraen 0.5 m<sup>3</sup>/s para suministrar servicio de agua potable al Campo Militar No. 1 de la Secretaría de la Defensa Nacional y la zona urbana de Huixquilucan, quedando 2.75 m<sup>3</sup>/s para ser aprovechados en la caída de Las Palmas. Entre Las Palmas y San Joaquín se derivan 2.35 m<sup>3</sup>/s hacia la zona de Atzacapotzalco y Tacuba, quedando solamente 0.4 m<sup>3</sup>/s para ser turbinados en la caída de San Joaquín.

Datos registrados por estaciones hidrométricas localizadas en el acueducto que nos ocupa arrojan los siguientes resultados:

<b>Caída</b>	<b>Gasto En Metros Cúbicos Por Segundo</b>		
	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
San Bartolito	2.5	3.25	3.80
El Borracho	2.5	3.25	3.80
Las Palmas	2.3	2.75	3.60
San Joaquín	0.2	0.40	0.75

De la ecuación para determinar la potencia en kW de una central hidroeléctrica, en función del gasto, la caída y las eficiencias de la turbina, generador y transformador, se tiene:

$$P = 9.81 * Q * Hn * E$$

Donde:

$$E = Et * Eg * Et$$

Considerando 0.9 de eficiencia para la turbina, 0.95 para el generador y 0.99 para el transformador, se tendrá para las cuatro caídas lo siguiente:

**Generación media anual con Factor de Disponibilidad  
promedio de 94%**

<b>Caída</b>	<b>Hn</b>	<b>Gasto Prom</b>	<b>Kw</b>	<b>Mwh/Año</b>
Sn Bartolito	88.3	3.25	2383	20,874
El Borracho	45.5	3.25	1228	10,757
Las Palmas	105.6	2.75	2411	21,123
San Joaquín	26.1	0.40	87	759
<b>Total</b>			<b>6109</b>	<b>53,513</b>

Considerando los 10,000 kW de las centrales Portezuelos I y II, en el estado de Puebla, y de San Sebastián, La Trinidad, Coacoyunga y San Miguel Regla, en el estado de Hidalgo con el mismo factor de disponibilidad de 94%, la generación anual adicional en estas centrales podrá ser del orden de 82,344 MWH adicionales, mismos que sumados a los 53,513 del acueducto Lerma-México nos dan un total de 135,900 MWH.

Estos 135.9 millones de kWh pueden ser aprovechados por los gobiernos de los estados de México y Puebla entregándolos a Comisión Federal de Electricidad, previa celebración de un convenio de porteo de energía, tal como está previsto en el artículo 36 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, lo que significa un ahorro considerando que la tarifa No. 5 de alumbrado público que pagaban los estados y municipios a CFE, octubre de 2001, de 1.45 \$/kWh, teniendo además un factor de escalación mensual acumulativo de 1.012:

$$\text{Ahorro} = 135.9 * 1.45 = 197 \text{ millones de pesos anuales}$$

El costo del porteo para el caso de alimentadores de distribución de 13.8, 23 o 34.5 KV es del orden de \$ 0.414/kWh, por lo que al ahorro antes calculado habrá que descontar 56 millones de pesos, quedando un ahorro neto de 79.9 millones de pesos por año, sin considerar los incrementos mensuales acumulativos citados.

El ahorro antes calculado deberá ser suficiente para cubrir por lo menos los intereses de la inversión necesaria en ingeniería, obra civil, obra electro-mecánica y costos de puesta en servicio requeridos por cada central. El análisis económico no es objeto del presente estudio; sin embargo se llevó

a cabo, habiendo arrojado resultados positivos pues, en todos los casos, estas inversiones generan un Valor Presente Neto positivo de magnitud significativa.

En otro orden de ideas, es importante hacer notar que en el aspecto ecológico la sustitución de 135,900 MHW, producidos mediante la incineración de combustibles fósiles, representa un ahorro de 340,000 barriles de petróleo al año y esto significa dejar de emitir 68,000 toneladas de contaminantes a la atmósfera, principalmente en forma de dióxido de carbono.

#### **4.7 ACUEDUCTO TIJUANA-MEXICALI**

El Gobierno del estado de Baja California opera desde hace muchos años el acueducto Tijuana-Mexicali, con un gasto promedio anual de 3.65 m<sup>3</sup>/s y un desnivel máximo del orden de los 600 m. En virtud de lo anterior, la potencia que es posible obtener de esta caída será de:

$$P = 9.81 * Q * H_n * E$$

$$P = 9.81 * 3.65 * 600 * 0.9 * 0.95 * 0.99$$

$$P = 18,185 \text{ kW}$$

Si bien una central hidroeléctrica de 18 MW no se puede considerar como un esquema microhidráulico, no es posible dejar de mencionarlo, toda vez que el acueducto está operando, como se refirió, desde hace más de 25 años, y el aprovechamiento de este salto en Tecate, B.C., se pudo haber llevado a cabo desde hace muchos años, máxime que desde diciembre 23 de 1992, fecha en que se expidió la Nueva Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, en la que se permite la importación y exportación temporal de energía, el Gobierno de Baja California ha podido, desde entonces, generar esta energía, misma que pudiera sustituir la generación a base de combustibles fósiles de la central termoeléctrica de Rosarito, Baja California, de la Comisión Federal de Electricidad, o en el supuesto que a dicho organismo no le interese recibir esta generación por ser el Sistema Eléctrico Tijuana-Mexicali de CFE superavitario, esta energía se puede entregar previo convenio, a las empresas eléctricas San Diego Gas & Electric, Co. o a la Southern California Edison.



La potencia de la Central Hidroeléctrica de Tecate se puede aprovechar prácticamente sin necesidad de llevar a cabo ninguna obra hidráulica o civil, y las opciones para llevar a cabo este aprovechamiento son:

Opción 1) Generar energía eléctrica con una unidad de 15 MW o bien tres unidades de 6 MW, usar la red de 69 KV de CFE, previa celebración de un convenio de porteo de energía en base a lo establecido en el artículo 36 de la Ley del Servicio Público de energía eléctrica, y hacer llegar la energía generada en la CH Tecate a los sistemas de alumbrado público y de bombeo de aguas potables y negras de Tijuana y Mexicali, así como al nuevo proyecto del tren eléctrico de Tijuana. (Figura 33).

Opción 2) En el caso de que CFE no muestre interés en recibir energía de la CH Tecate, construir una línea de 69 KV entre Tecate y Tijuana, así como ramales para interconexión con los sistemas de 69 KV de la San Diego Gas & Electric, Co. y/o Southern California Edison, alimentando los 7 MW demandados por el proyecto del tren eléctrico de Tijuana, y los excedentes venderlos a las empresas norteamericanas, celebrando los convenios de respaldo correspondientes. (Figura 34).

Opción 3) Entregar la generación de la CH Tecate a la Red de 69 KV de la San Diego Gas & Electric o Southern California Edison celebrando con alguna de ellas un convenio de venta de excedentes, de porteo de energía así como de respaldo por falla y/o mantenimiento de la central.

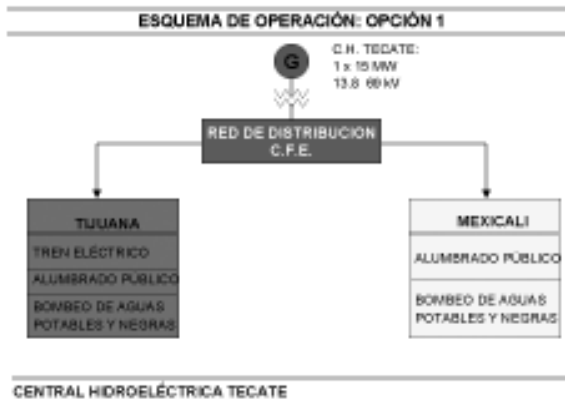


Figura 33



Figura 34

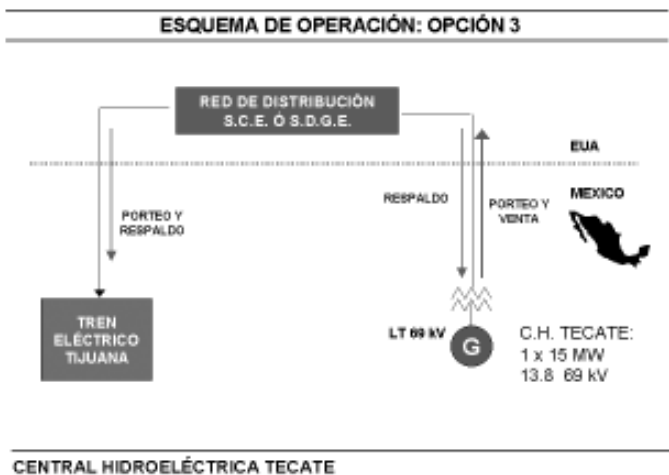


Figura 35

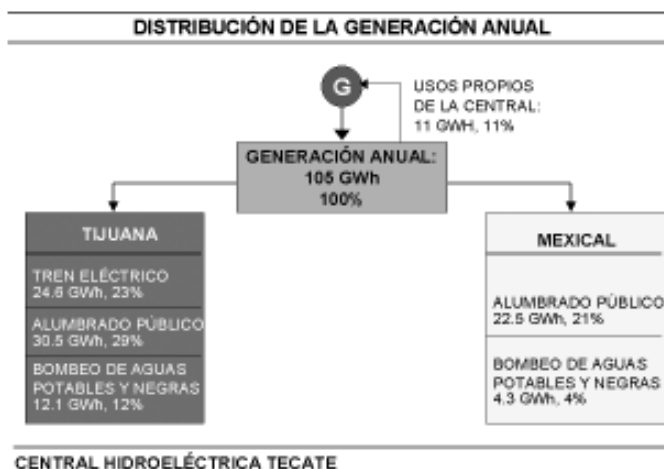


Figura 36

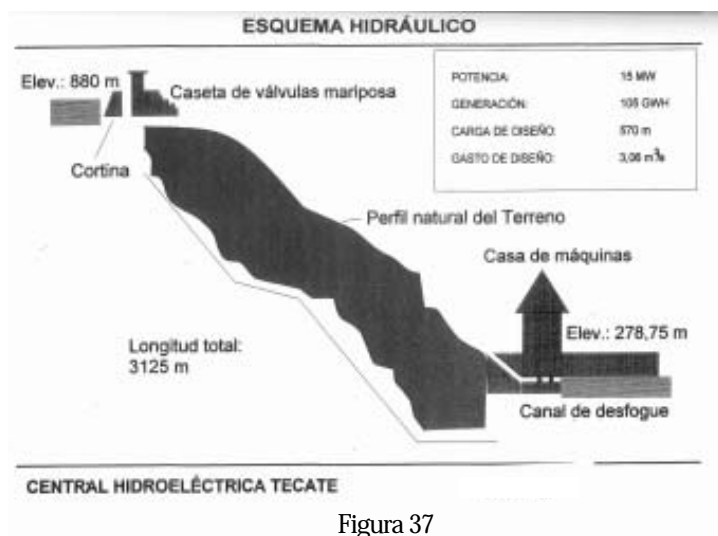


Figura 37

(Figura 35). En las Figuras 36 y 37, se aprecia el volumen posible de generación de la central hidroeléctrica la distribución de la misma, así como al esquema hidráulico.

# 5. BIOMASA

Uno de los acuerdos paralelos del Tratado de Libre Comercio suscrito entre México, Canadá y Estados Unidos, en vigor desde el primero de enero de 1994, establece la correcta disposición de los desechos sólidos municipales por parte de los ayuntamientos, el Departamento del Distrito Federal o bien aquellas empresas privadas a las que se les haya otorgado una concesión para el manejo, aprovechamiento y disposición final de la basura.

En la Ciudad de México y su área metropolitana habitan cerca de 20 millones de personas que generan 20,000 toneladas de basura diariamente. Existen dos formas de aprovechamiento de los desechos sólidos municipales, sin que ello represente agresión al medio ambiente.

## **5.1 INCINERACIÓN DIRECTA**

En este tipo de instalaciones es factible la incineración directa de la basura, tal como viene de los centros de recolección y estaciones de transferencia. Los sistemas más conocidos son el *Combustor O'Connor de Westinghouse*, el *Martin de Alemania* y el *Lecho Fluidizado de Götaverken de Suecia*. En estas instalaciones los desechos sólidos municipales son usados como combustible para la generación de vapor y eventual accionamiento de una turbina de vapor. El combustor es un cilindro de 20 m de longitud por tres de diámetro, que se instala horizontalmente con una inclinación de 15°, que gira a muy baja velocidad y a donde se hace llegar la basura a través de una banda transportadora que descarga en una tolva.

En la primera sección del combustor existe una batería de quemadores accionados con gas natural, cuya función es deshidratar la basura para que posteriormente, en la segunda sección, se quemen en forma espontánea y en la sección final se queman las cenizas, mismas que luego son capturadas en un precipitador electrostático y eventualmente aprovechadas en material de construcción, barreras de ruido, bases para carpetas asfálticas, étera.

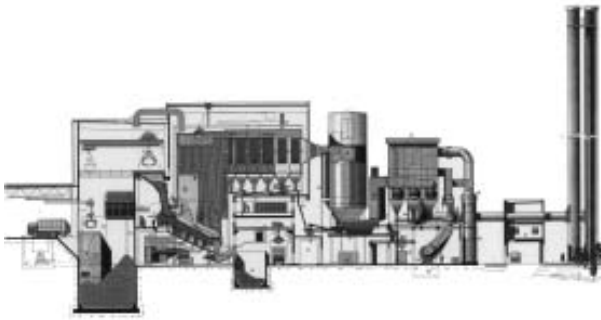


Figura 38

La práctica de incineración directa de los desechos sólidos municipales en países desarrollados es muy común, en virtud de que el poder calorífico de la basura es significativo debido al gran contenido de madera, cartón, papel, trapo, plásticos, etc., que son materiales combustibles con alto poder calorífico. En estos casos, el contenido de materia orgánica en la basura es inferior al 10%, dado de que en la gran mayoría de los hogares en países desarrollados existe un triturador de desperdicios alimenticios en las cocinas. En la Figura 38 se muestra un esquema de incineración directa de la basura para obtener vapor y generar energías eléctrica y calorífica.

## 5.2 RELLENOS SANITARIOS

Este es un procedimiento mundialmente aceptado para la disposición final de los desechos sólidos municipales, se usa prácticamente en todo el mundo, y en el caso de rellenos sanitarios construidos exclusivamente para la correcta eliminación de la basura, el poder calorífico de la misma no tiene importancia. El relleno sanitario consiste en una excavación reticular, en cuyos taludes y fondo se instala una geomembrana impermeable para con-

tener tanto la basura como los compuestos que se generan cuando esta se encuentra en ausencia de oxígeno. En algunos casos, para evitar las excavaciones, se aprovechan tiros de minas abandonadas o barrancas, siempre y cuando no se dañe la flora y la fauna del lugar.

### 5.3 COMPOSICIÓN DE LA BASURA EN MÉXICO

En México, como en muchos otros países en vías de desarrollo, la gran mayoría de las familias, cerca de trituradores de desperdicios alimenticios en las cocinas; por esta razón, aproximadamente el 45% de la basura está compuesta de desechos alimenticios. En la siguiente tabla se muestra un análisis de la composición de los desechos sólidos municipales en México.

Desperdicios alimenticios	45.4%
Desperdicios de Jardinería	4.9%
Papel	14.8%
Vidrio y cerámica	4.6%
Cartón	6.7%
Metal	1.7%
Textiles	0.9%
Hules y plásticos	8.8%
Madera	2.1%
Escombros, ceniza y tierra vegetal	10.1%
<b>Total</b>	<b>100.0%</b>

### 5.4 PRINCIPIOS DE DESCOMPOSICIÓN DE LA BASURA EN RELLENOS SANITARIOS

Los desechos sólidos municipales depositados en rellenos sanitarios en ausencia de oxígeno se descomponen por una combinación de procesos químicos, físicos y biológicos. Estos procesos generan dos compuestos denominados *biogases y lixiviados*.

Es de mencionarse que en México, como en muchos otros países del tercer mundo, la falta de puestos de trabajo obliga a muchas personas a vivir del reciclamiento manual de parte de los desechos sólidos municipales, por lo que al final de este reciclamiento manual la materia orgánica alcanza valores del 90%. Esta es la razón fundamental por la que en los rellenos sanitarios nacionales la generación de biogases es muy significativa en lo que a cantidad y calidad se refiere.

### 5.5 COMPONENTES DEL BIOGAS EN MÉXICO

<b>Componente</b>	<b>Concentración por volumen</b>	<b>Característica</b>
Metano (CH4)	55 %	Explosivo
Bióxido de carbono (CO2)	35%	Acidez
Hidrógeno (H2)	<5%	Explosivo
Oxígeno (O2)	<5%	Inocuo
Mercaptanos (CHS)	1.1%	Mal olor
Ácido sulfhídrico (H2S)	<2%	Mal olor

Existen otros componentes en cantidades muy pequeñas conocidas como *traza*, éstos son: bencenos, toluenos y bisulfatos.

En la Figura 39 se muestra un diagrama esquemático de un relleno sanitario en el que se pueden apreciar la superficie y profundidad de la celda, los pozos de extracción del biogas, los cabezales de biogas, el soplador que le inyecta presión negativa al sistema y succiona el biogas, la estación de lavado para eliminación de la humedad, los grupos motor -Generador y la subestación elevadora.

En la Figura No. 40 se aprecia un pozo de extracción de biogas y, en la Figura 41, el detalle del área de influencia de los pozos de extracción de biogas en el relleno sanitario.

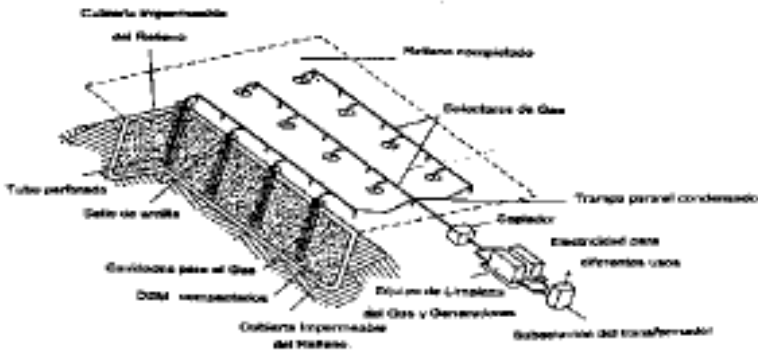


Figura 39



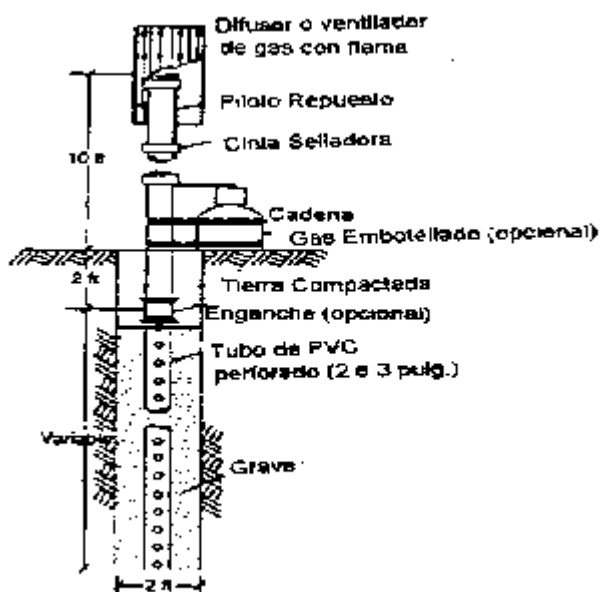
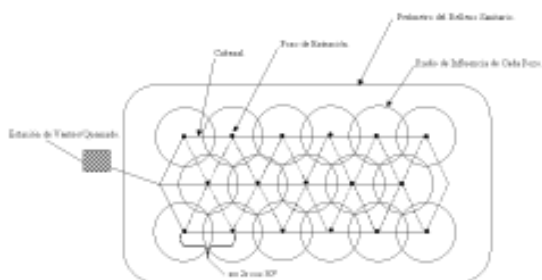


Figura 40



Área de Influencia de Pozos de Extracción en un Relleno Sanitario.

Figura 41

## **5.6 SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE BIOGAS DE UN RELLENO SANITARIO**

En virtud del alto contenido de metano (55%) en el biogas generado en un relleno sanitario y de su alto poder calorífico, del orden de 650 Btu/pe<sup>3</sup>, este combustible puede ser usado en un motor de combustión interna mismo que, acoplado a un generador, se pueden obtener a costos reducidos, potencias eléctricas significativas. En el caso de que las cantidades de biogas sean aun mayores, es factible sustituir el motor de combustión interna por una turbina de gas.

En cualquiera de los dos casos, el biogas debe ser tratado para eliminar la humedad y el azufre a través de una planta, que consiste en una estación de compresión para eliminar la humedad y, en el caso de azufre, el biogas se hace pasar a través de limaduras de hierro para precipitarlo.

En ciertos casos es posible separar el bióxido de carbono del metano mediante un proceso de absorción físico o químico o bien por una membrana de separación; el metano se puede usar como combustible para vehículos automotores o para generación eléctrica, y el bióxido de carbono para la industria de aguas carbonatadas.

## **5.7 FORMACIÓN DE LIXIVIADOS**

El líquido percolado a través de los desechos sólidos municipales debido al agua de lluvia o bien a corrientes subterráneas se conoce como lixiviado, es sumamente agresivo al medio ambiente, por lo que es necesario controlarlo en forma cuidadosa para evitar contaminación a los acuíferos subterráneos. Existen varias formas de disposición final de los lixiviados, las cuales son:

- Hacer llegar, por gravedad o por bombeo, los lixiviados a un estanque de evaporación donde, al contacto con el aire, se evaporan sin afectación al medio ambiente.
- Descargarlo al sistema de drenaje municipal.
- Reinyectar el lixiviado al relleno sanitario para acelerar la formación de biogas.
- Depositarlo en contenedores para su eliminación posterior.

La composición del lixiviado varía con la edad del relleno sanitario; en consecuencia, las alternativas para manejar el lixiviado dependerán de si se trata de un relleno sanitario nuevo o uno maduro.

### 5.8 CONTROL DE BIOGAS Y LIXIVIADOS

La correcta administración y control de los lixiviados y el biogas es de vital importancia, toda vez que ambos fluidos pueden representar riesgos importantes. Los lixiviados, por la contaminación de acuíferos y el biogas por que se puede acumular en sótanos de edificios con riesgo de explosión. La forma más común de controlar estos dos elementos es mediante la instalación de pozos de control y monitoreo en una franja perimetral construida alrededor del relleno sanitario.

### 5.9. RELLENO SANITARIO PRADOS DE LA MONTAÑA

Este relleno sanitario se localiza en la parte occidental de la Ciudad de México, la superficie total del mismo es de 250,000 metros cuadrados, de los cuales 220,000 recibieron los desechos sólidos municipales de junio de 1987 a agosto de 1994. En ese lapso se depositaron aproximadamente 5'635,000 toneladas de basura, el peso volumétrico de la basura fue de 900 kg/m<sup>3</sup>, lo que significa que el volumen de basura depositado en el relleno sanitario fue de 6'261,000 m<sup>3</sup>.

De acuerdo con la composición de los desechos sólidos municipales en México, los biodegradables son:

Rápidamente biodegradables	55% de los DSM	Se descomponen en 6 años
Moderadamente biodegradables	33% de los DSM	Se descomponen en 15 años
Lentamente biodegradables	12% de los DSM	Se descomponen en 60 años

Con estudios y mediciones llevados a cabo inmediatamente después del cierre final del relleno sanitario, se estimó una producción anual de biogas de 19.5 millones de metros cúbicos de metano por año como promedio.

En términos de pies cúbicos se tiene:

$$19.5 * 10^6 \{m^3\} * 35.29 \{pie^3/m^3\} = 688.16 * 10^6 \text{ pie}^3/\text{año}$$

La producción por hora será:

$$688.16 * 10^6 \{pie^3/año\} / 8760 \{hr/año\} = 78,557 \{pie^3/hr\}$$

Tomando en cuenta algunos análisis, se encontró que el poder calorífico del metano contenido en el biogas es de 650 Btu/pie<sup>3</sup>, por lo tanto:

$$650 \text{ {Btu/}pie^3\text{}} * 78,557 \text{ {}pie^3\text{/hr}} = 51'062,050 \text{ {Btu/hr}}$$

Si recordamos que: 1 Btu = 0.293 Watts-hora Entonces:

$$51'062,050 \text{ {Btu/hr}} * 0.293 \text{ {Watts-hora}} = 14,961 \text{ kW}$$

La totalidad del biogas captado en este relleno sanitario proviene de 111 pozos de extracción, los cuales cuentan con tubos ranurados de PVC de 10 pulgadas de diámetro. Dichos pozos están conectados entre sí a través de un cabezal de tubos del mismo diámetro, cuya función es hacer llegar el biogas mediante extractores a una estación de lavado en la cual, mediante compresión, se elimina la humedad de biogas, y de requerirse, se hace pasar a través de limaduras de hierro para precipitar el azufre excedente.

El biogas, libre de humedad y de azufre, puede ser usado en motores de combustión interna, ya sea para vehículos automotores o bien para la generación de energía eléctrica; normalmente se utilizan en estos casos motores turbo cargados, en virtud de que los niveles de emisión a la atmósfera de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono son inferiores a los de aspiración natural. En el caso que nos ocupa, si los 14,961 kW que se pueden obtener con el biogas generado en el relleno sanitario Prados de la Montaña los afectamos por una eficiencia global del ciclo de 35%, se pueden obtener 5,236 kW y si se asumen 236 kW como usos propios de la central de biogas quedará una generación libre de 5 MW para ser entregada a la empresa eléctrica. En este tipo de máquinas el factor de disponibilidad típico anual es de 95%, por lo que la generación anual de energía puede ser 41'610,000 kWh. Los costos típicos de generación con este sistema son de 0.07 USD/kWh.

Es de mencionarse que, en términos de la composición de los desechos sólidos municipales del relleno sanitario Prados de la Montaña, se espera que dicha instalación genere durante 25 años cantidades suficientes de biogas para la operación de los grupos motor-generador.

En México la responsabilidad de la disposición final de los desechos sólidos municipales, así como la prestación del servicio de alumbrado público en parques, calles y jardines recae en los municipios y en el Departamento del Distrito Federal.

La tarifa No. 5 de Alumbrado Público que aplica Luz y Fuerza del Centro al Departamento del Distrito Federal en baja tensión para octubre del 2001 fue de \$ 1.40/kWh y considerando una paridad de \$ 9.5/USD, el costo sería de 0.1473 USD/kWh. Además, esta tarifa se viene incrementando mensualmente en un 1.2%, por lo que las alzas anualizadas son de 15.39%.

En diciembre de 1992 se publicaron en el *Diario Oficial de la Federación*, las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, las que, se introduce por primera vez la posibilidad de que aquellas industrias que generen su propia electricidad o cogeneradores, que tengan excedentes de potencia y energía puedan, previo convenio con la suministradora, hacer uso de la infraestructura de transmisión y/o distribución, para hacer llegar sus excedentes de potencia y energía a sus empresas afiliadas ubicadas en sitios distintos a los de la central generadora del usuario. Estos convenios de *porteo de energía* así como la figura de *productores independientes de energía*, harán posible, en el futuro cercano, la participación de los inversionistas privados en lo que se refiere a garantizar la oferta energética del país.

Para el caso de convenios de porteo de energía utilizando únicamente la red de distribución de 23 KV de Luz y Fuerza del Centro se ha desarrollado un algoritmo por parte de dicho organismo, para calcular el costo del porteo de energía el cual se basa en lo siguiente:

- Distancia en Km
- Voltaje en KV
- Carga en kW
- Costo evitado de líneas y redes

Para el caso del relleno sanitario Prados de la Montaña localizado en Santa Fe y de la aportación de 5 MW a las barras de 23 KV de la subestación Contadero de Luz y Fuerza del Centro, se estima que el costo del porteo desde la subestación hasta las lámparas de alumbrado público será de un centavo de dólar por kWh.

Las ventajas evidentes del proyecto son:

Ahorro para el Departamento del Distrito Federal en el pago que hace a Luz y Fuerza del Centro por concepto de energía eléctrica para el sistema de alumbrado público:

(Costo de generación + costo de porteo de energía) = 7 + 1 = 8 cvs  
USD/kWh

Precio del kWh en tarifa 5 pagado por el DDF a LYF = 12.79 cvs  
USD/kWh

Diferencia = 12.79 – 8 = 4.79 cvs USD/kWh

Ahorro anual = (41'610,00 {kWh} \* 0.0479 {USD/kWh}) \* 1.1539 =  
2'299,860 USD

Las ventajas para LyF son: dejar de suministrar 5 MW al sistema de alumbrado público del DDF, con lo cual se podrán diferir las inversiones requeridas para el suministro de esta demanda.

Para la población, la principal ventaja es la adecuada disposición de los desechos sólidos municipales, así como la reducción en la emisión de contaminantes, al sustituir generación con combustóleo por generación con metano.

Los rellenos sanitarios, una vez sellados, se pueden cubrir con pasto y convertirse en campos de golf o áreas verdes.

Finalmente, este proyecto puede ser replicado en cualquier asentamiento humano en donde se generen cantidades suficientes de desechos sólidos municipales para la generación de energía eléctrica o bien para usar el metano como combustible en los motores de los vehículos del transporte urbano que, en muchos casos, también operan los municipios.

## 6. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA DE MUY BAJA TEMPERATURA EN LOS CAMPOS MAGNÉTICOS DE GRANDES INDUCTORES.

Los grandes avances tecnológicos habidos en los últimos 20 años en materia de electrónica, telecomunicaciones, automatización, control, robótica ciencias de la computación y desarrollo de nuevos materiales han traído como consecuencia la globalización de la economía. El ejemplo más palpable de lo anterior es el Tratado de Libre Comercio suscrito entre México, Canadá y los Estados Unidos de Norteamérica, así como otros tratados comerciales que nuestro país ha celebrado con otras naciones Latinoamericanas y europeas. Lo anterior, entre otras cosas, representa la imperiosa necesidad de cambiar los esquemas tradicionales de suministro de energía eléctrica a los sectores residenciales, comerciales, industriales y de servicios en todo el mundo.

Tradicionalmente, las empresas suministradoras de energía eléctrica en el mundo (CFE y LyF en México) han diseñado, construido y operado, hasta la fecha, sistemas centralizados de generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica para satisfacer las necesidades de sus usuarios. Estos esquemas, por ser monopolios naturales, se oponen al marco conceptual de las economías abiertas y globalizadas. Además, en muchos de los casos, sobre todo de países en vías de desarrollo, son empresas (generalmente públicas) altamente ineficientes.

En virtud de lo anterior, prácticamente en todo el mundo existe una tendencia hacia lo que en la actualidad se conocen como *Sistemas de transmisión de acceso abierto* (Transmission open access systems).

Esto significa que cualquier persona física o moral, previo cumplimiento de las disposiciones legales vigentes sobre el particular, puede satisfacer plenamente sus necesidades de potencia y energía, sobre todo en el caso de esquemas de cogeneración en donde la necesidad de generar el vapor requerido por el proceso industrial hacen que los costos de generación de energía eléctrica sean prácticamente marginales. Los excedentes de potencia y energía de estas industrias pueden ser vendidos a otras empresas, aunque se encuentren a decenas o cientos de kilómetros de donde se instale el esquema de cogeneración, para lo cual se deberá llegar previamente a la celebración de un convenio de porteo de energía con la Comisión Federal de Electricidad o con Luz y Fuerza del Centro.

Para que en México los sistemas de transmisión de acceso abierto sean una realidad se deberá enviar una iniciativa al Congreso de la Unión para modificar el VI párrafo del artículo 27 constitucional, que establece la exclusividad del Estado, a través de Comisión Federal de Electricidad, para la generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica que tenga como fin la prestación de un servicio público. Sin embargo, como la tendencia mencionada es de carácter mundial, es de esperarse que en un futuro cercano se legisle sobre el particular para darle cabida a los sistemas de transmisión de acceso abierto.

Lo antes expuesto ha desarrollado en países industrializados diferentes formas de optimización de los recursos destinados a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica para la prestación del servicio público correspondiente. Ahora es común hablar de *productores independientes de energía de cogeneradores y autoabastecedores con excedentes de potencia y energía* susceptibles de venderse a las empresas eléctricas. Igualmente cada día con más frecuencia se requiere a CFE y LyF por parte de autoabastecedores los servicios de porteo de energía.

Con la base en lo dicho hasta aquí, los sistemas de ahorro, conservación y uso eficiente de la energía, las fuentes renovables, como la solar, la eólica, la microhidroelectricidad y la biomasa, así como los sistemas para la administración y reducción de la demanda de potencia eléctrica sin afectación de los procesos productivos han cobrado en la actualidad una gran importancia.

En México, así como en la mayoría de los países en vías de desarrollo, la diferencia entre la demanda de potencia en las horas pico comparadas con



la de las horas valle es prácticamente de 3 a 1. En adición a lo anterior, las horas pico son generalmente de 2 a 4 (18:00 a 22:00 hs) durante los días hábiles, lo cual significa que una parte importante de la infraestructura del Sector Eléctrico Mexicano sólo se usa durante 4 horas en los días hábiles, lo que representa un importante dispendio en recursos de capital.

Es por lo antes expuesto que los programas de administración de la demanda de potencia son de gran importancia para el sector eléctrico, ya que difieren parte de las inversiones necesarias para garantizar la oferta de energía, al aprovechar mejor la infraestructura eléctrica de las empresas suministradoras.

Desde el punto de vista de los usuarios industriales, comerciales y de servicios para más de 100 kW de demanda en media tensión (13.2, 23, o 34.5 KV), en los que la tarifa aplicada por CFE o por LyF es una tarifa horaria que penaliza la demanda de potencia y el consumo de energía en las horas en que ocurre la demanda máxima, si bien, en estricto rigor no existe una reducción en los consumos de energía, sí se reduce el valor de la demanda máxima, ya que parte de la misma se transfiere a las horas valle, lo que representa importantes reducciones en el importe de la factura pagada a CFE o LyF por concepto de energía eléctrica.

En el caso de las empresas eléctricas que cuentan con sistemas hidroeléctricos significativos existe un modelo de administración de la demanda de potencia conocido como *Estaciones de Rebombeo*, mismo que fundamentalmente consiste en tener dos vasos de almacenamiento a distintos niveles, y en un punto intermedio una casa de máquinas equipada con grupos motor-generator y turbina-bomba. En estos esquemas, durante las horas de la demanda máxima, el agua se hace circular del vaso de almacenamiento superior al inferior, pasando por la casa de máquinas, donde los equipos están en modo de turbina-generator, aportando potencia y energía al sistema durante las horas de la demanda máxima.

Una vez que concluyó la demanda máxima del sistema, el agua almacenada en el vaso inferior se bombea hacia el depósito superior, por lo que los equipos deberán trabajar en modo motor-bomba, con objeto de bombear el agua al depósito superior y tenerla disponible para ser turbinada en la siguiente hora de demanda máxima. Este sistema, en alguna forma, representa un almacenamiento indirecto de la energía y coadyuva en el incre-

mento del factor de planta de las empresas suministradoras, con lo cual se optimiza la operación de las centrales eléctricas.

La versión electrónica de este modelo se conoce como *Sistemas de almacenamiento de energía de muy baja temperatura en los campos magnéticos de grandes inductores* (SMES. Superconducting Magnetic Energy Storage). Este modelo se basa en el hecho de que al hacer pasar una corriente eléctrica a través de un inductor (bobina) se tiene, por una parte, una pérdida de energía por efecto Joule expresada en Watts, que es directamente proporcional a la resistencia ohmica del inductor multiplicada por el cuadrado de la corriente que circula a través de él. En este modelo se persigue la reducción a cero de las pérdidas por efecto Joule, lo cual prácticamente se logra al bajar la temperatura de la bobina tan cerca del cero absoluto como sea posible, para que el valor de la resistencia ohmica del inductor sea muy cercano a cero y las pérdidas por efecto Joule sean despreciables.

Una importante cantidad de energía se puede almacenar en el campo magnético de la bobina la cual puede ser utilizada en cortos períodos, a la hora en que ocurre la demanda máxima del sistema eléctrico, con lo que se logran reducciones importantes en la hora pico. En la Figura 42 se muestra un diagrama de la forma de almacenamiento de energía en un inductor.

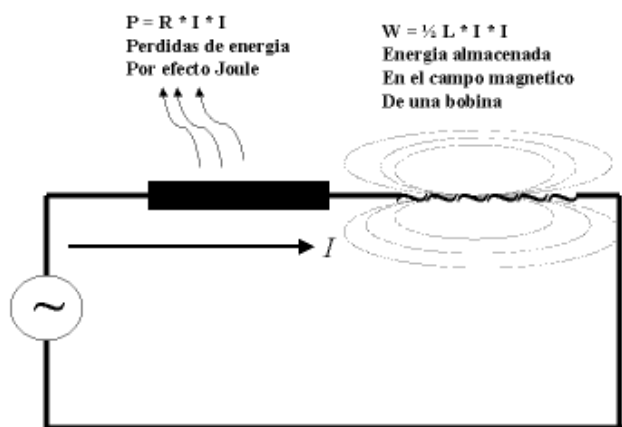


Figura 42

El concepto matemático de lo expuesto es el siguiente:

$$e = L \left[ \frac{di}{dt} \right]$$

$$p = e i$$

$$p = L i \left[ \frac{di}{dt} \right]$$

La ecuación anterior representa el valor de la potencia expresada en Watts y la energía almacenada en el campo magnético del inductor se obtendrá integrando en el tiempo la potencia antes obtenida.

$$W = \int_0^t p \, dt$$

$$W = \int_0^t L i \left( \frac{di}{dt} \right) dt = \int_0^t L i \, di \quad \{\text{Joules}\}$$

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad \{\text{Joules}\}$$

La historia del almacenamiento de energía en los campos magnéticos de los inductores se remonta a 1880, cuando Nikola Tesla descubrió este fenómeno; de hecho, la densidad de flujo magnético se expresa en su honor como flujo magnético expresado en Weber entre el área en metros cuadrados. La unidad de la densidad de flujo magnético se conoce como *Tesla*.

$$B = \frac{\phi}{A} \left[ \frac{Wb}{m^2} \right] \quad (\text{Tesla})$$

El fenómeno de la superconductividad (conductores criogénicos) fue analizado por primera vez en metales puros en 1911, por Kamerlingh Onnes, y en aleaciones por Leyden, en Berlín, en 1928. J.J. Steckly sugirió por primera vez en 1963 la posibilidad de almacenar energía en el campo magnético de una bobina en una cámara criogénica de muy baja temperatura.

El Departamento de Energía y el de Defensa de la Unión Americana han invertido entre 1986 y 1995 70 millones de dólares para el desarrollo y eventual fabricación comercial de sistemas de almacenamiento de energía de muy baja temperatura en los campos magnéticos de grandes inductores.

Las aplicaciones comerciales de estos dispositivos salieron al mercado en 1988 y en 1994 se inició la construcción de un sistema como los que nos ocupan para proporcionar la reserva rodante del sistema eléctrico de Anchorage, Alaska. Este sistema está operando satisfactoriamente desde 1997.

A nivel de laboratorios, el centro de investigación Houston Advanced Research Center tiene en operación el dispositivo superconductor de mayor capacidad de corriente en el mundo, mismo que puede transportar en un inductor contenido en una cámara criogénica a 1.8 Kelvin, una corriente de 303,000 amperes en un campo magnético de 5 Teslas.

Las principales características de los sistemas de almacenamiento de energía de muy baja temperatura en los campos magnéticos de grandes inductores (SMES) son:

- Respuesta muy rápida (menos de 1 Hz)
- Operación en los cuatro cuadrantes
- Proporciona potencia real y reactiva (MW y MVAR)
- Absorbe potencia real y reactiva (MW y MVAR)
- Rangos de potencia de MW @ GW
- Rangos de energía de MWH @ GWH

- Alta eficiencia de almacenamiento al reducir prácticamente a cero la resistencia del inductor por efecto de la baja temperatura (1.8 K)
- No afecta al medio ambiente, inclusive, cuando se requiere, se puede instalar una pantalla magnética
- Equipo de larga duración que requiere muy poco mantenimiento
- Los beneficios más importantes derivados del uso de estos dispositivos son:
  - Reducción de la demanda máxima
  - Sensible mejora en la capacidad de transmisión
  - Soporte de voltaje
  - Fortalecimiento de la estabilidad de los sistemas eléctricos
  - Se puede usar como reserva rodante y para arranque negro de unidades
  - Diferimiento de inversiones en obras de infraestructura.

En México no existe hasta la fecha ninguna instalación de este tipo y dada la topología del sistema interconectado nacional -que tiene un sistema de transmisión de 400 y 230 KV poco mallado y muy largo, lo cual provoca embotellamiento de la energía por falta de líneas de transmisiones indudable que este tipo de dispositivos sería de gran utilidad para el sector eléctrico nacional.

En el cuadro siguiente se muestra el resultado de un análisis de costos llevado a cabo en 1997 por el Houston Advanced Research Center en el que se registran los costos para los diferentes tamaños de sistemas criogénicos de almacenamiento de energía en inductores.

**Costo en millones de dólares:**

	0.5 MWH	1 MWH	10 MWH	21 MWH
50 MW	24.4	29.7	88.8	140.4
100 MW	31.2	36.6	95.6	147.2
200 MW	41.6	46.9	106.0	157.6
400 MW	65.7	71.1	130.1	181.7

En las Figuras 43, 44, y 45 se puede apreciar esquemáticamente la forma en que se almacena energía en el campo magnético de un inductor, así como una concepción artística de una aplicación para un usuario industrial que puede reducir el valor de su demanda máxima mediante la aplicación de un equipo como el que se analiza.

### Superconducting Power Systems (SPS) an Enabling Technology

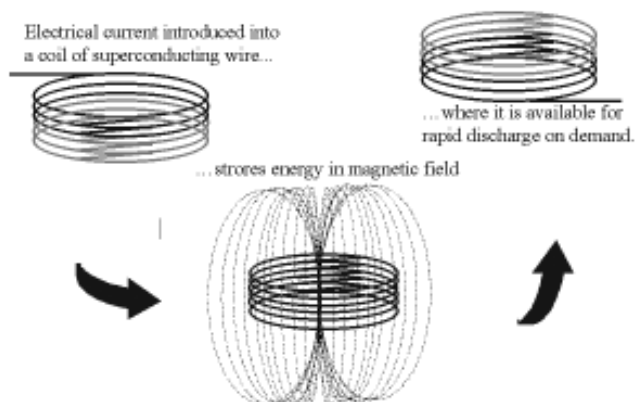


Figura 43

### IPM/SPS System Configuration

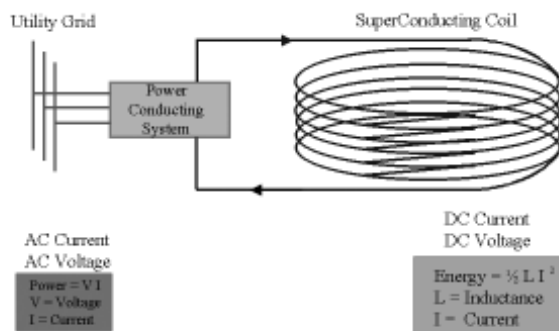


Figura 44

Figura No. 45

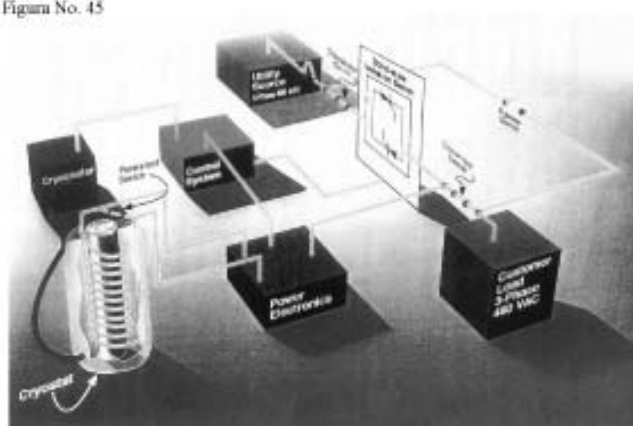


Figura 45





## 7. MICROESQUEMAS DE COGENERACIÓN

La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, en su artículo 36, establece que la Secretaría de Energía, considerando los criterios y lineamientos de política energética nacional y oyendo la opinión de Comisión Federal de Electricidad, otorgará permisos de *cogeneración* para generar energía eléctrica producida conjuntamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria o ambos cuando la energía térmica no aprovechada en los procesos se utilice para la producción directa o indirecta de energía eléctrica, o cuando se utilicen combustibles producidos en sus procesos para la generación directa o indirecta de energía eléctrica y siempre que:

1. La electricidad generada se destine a la satisfacción de las necesidades de establecimientos asociados a la cogeneración, siempre que se incrementen las eficiencias energética y económica de todo el proceso y que la primera sea mayor que la obtenida en plantas de generación convencionales. El permisionario puede ser o no el operador de los procesos que den lugar a la cogeneración.
2. El solicitante se obligue a poner sus excedentes de energía eléctrica a la disposición de la Comisión Federal de Electricidad, en los términos del artículo 36 Bis de la referida ley.

El artículo antes citado representa el marco legal para que los industriales que requieran de vapor como un insumo del proceso industrial, como

en casos de la industrias papeleras, de la cervecera, hulera, azucarera y la cementera, entre otras, puedan generar tanto el vapor como la electricidad requeridos por cada uno de estos procesos industriales, e inclusive vender sus excedentes de potencia y energía a Comisión Federal de Electricidad y/o Luz y Fuerza del Centro en los términos de la ley de la materia así como de su reglamento.

En alguna medida, los esquemas de cogeneración para la satisfacción total o parcial de las necesidades de energía térmica y eléctrica de las industrias han existido en México desde hace muchos años, tal es el caso de la industria azucarera en la que, además, se aprovecha el bagazo de la caña de azúcar como un combustible no convencional para producir vapor para el proceso industrial y la generación de energía eléctrica.

La diferencia estriba en que la venta de excedentes a Comisión Federal de Electricidad o Luz y Fuerza del Centro es permitida desde la modificación a la Ley del Servicio Público de energía Eléctrica, que se publicó en el *Diario Oficial de la Generación* el 23 de diciembre de 1992.

En vista de lo anterior no se pretende en este capítulo hablar de esquemas de cogeneración existentes desde hace varios años, sino analizar la factibilidad técnico-económica para aprovechar los gases de escape de pequeñas turbinas de gas para calentar agua usada en hospitales, hoteles, centros deportivos, baños públicos e inclusive casas habitación.

### **7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MICRO TURBINAS DE GAS**

Estos equipos se caracterizan por ser pequeños, ligeros autocontenidos y susceptibles de usarse para la generación de energía eléctrica en aplicaciones móviles y estacionarias. Son ideales como fuente de energía eléctrica en vehículos que cuenten además con algún mecanismo de almacenamiento de energía mecánica. De hecho estos vehículos de los cuales existen prototipos, funcionan con energía eléctrica en terrenos planos y a bajas velocidades y cuando requieren de mayor potencia para subir pendientes inclinadas, para aumentar la velocidad transitoriamente se puede usar el motor de combustión interna convencional. Este tipos de aplicaciones se conocen como *vehículos híbridos*

El presente estudio se limitará a las aplicaciones estacionarias para la generación de energía eléctrica y el aprovechamiento de los gases de esca-

pe para el calentamiento de agua. Los objetivos de diseño más importantes de los fabricantes de estas microturbinas son:

- Bajo costo
- Bajo mantenimiento
- Durabilidad
- Muy buena eficiencia en consumo de combustible en rangos de carga variables
- Bajas emisiones de contaminantes a la atmósfera

Los objetivos descritos se han logrado mediante:

- Diseño mecánico simplificado para reducir costos de operación y mantenimiento
- Cojinetes de aire
- Niveles de temperatura conservadores para incrementar la duración del equipo
- Recuperación del calor de los gases de escape para calentamiento de agua
- Cámara de combustión de bajas emisiones de contaminantes
- Electrónica de potencia que permite velocidades variables

Las potencias normales de las microturbinas de gas varían desde 25 hasta 75 kW, en condiciones ISO, esto es, al nivel del mar y a 15°C, por lo que habrá necesidad de llevar a cabo las correcciones que procedan por altitud y temperatura de operación promedio. Estas unidades se pueden operar en paralelo en grupos de hasta 24 máquinas.

En la actualidad en México, la mayoría de las tarifas eléctricas recibe subsidios cruzados con objeto de hacer competitivas las industrias nacionales en el entorno mundial en que se desenvuelven. Evidentemente, estos subsidios se están reduciendo paulatinamente y eventualmente desaparecerán. En este escenario de precios reales de los energéticos en nuestro país se hará mucho más atractiva la satisfacción total o parcial de las necesidades de potencia y energía eléctrica, así como la satisfacción total de necesidades térmicas.

A pesar de los subsidios implícitos y explícitos mencionados anteriormente, existen casos en los que en la actualidad se justifica la utilización de las microturbinas de gas, como se puede apreciar en los apéndices anexos.



## 8. CONCLUSIONES

En México, en términos generales, no existe una conciencia y mucho menos una motivación que obligue a personas físicas y morales al ahorro de energéticos primarios y secundarios, ya que no se privilegian los esquemas de cogeneración mediante incentivos fiscales y posibilidad real de venta de excedentes de potencia y energía al sector eléctrico nacional.

Por lo que respecta al aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, éstas tendrán pocas posibilidades de desarrollo mientras subsistan los subsidios a las tarifas eléctricas y sus aplicaciones estarán limitadas a la alimentación eléctrica a cargas remotas o a meros proyectos piloto, más enfocados a aspectos de investigación y desarrollo que a la aplicación masiva de este tipo de esquemas.

Es pertinente mencionar que en algunos lugares de la costa Este de los Estados Unidos de Norteamérica, en los que el costo de la energía eléctrica para fines residenciales fluctúa entre 10 y 16 centavos de dólar por cada kWh, los nuevos diseños de unidades habitacionales con casas unifamiliares incluyen celdas fotovoltaicas para la alimentación del sistema de iluminación de las residencias y, de hecho, se tienen dos alambrados diferentes, uno en 48 volts de corriente continua para alimentar el sistema de iluminación, y otro de 120/208 volts de corriente alterna trifásica para alimentar lo que constituyen las cargas de fuerza.

En 1996 el consumo de energía eléctrica para fines domésticos fue de 28,482.5 GWh y en 1997 la estimación anual con datos reales a junio fue de 29,930 GWh, según el compendio estadístico del Sector Energía 1980-1997 editado por la Secretaría de Energía. De las cantidades mencionadas, el 20% es usado para fines de iluminación y esta energía es susceptible de ser sustituida por energía solar fotovoltaica, siempre y cuando el costo promedio por kWh sea de ocho centavos de dólar por cada kWh.

Desde hace más de un año la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía preparó, con la participación de algunas universidades y centros de investigación y desarrollo, un proyecto de iniciativa de ley para ser enviado al Congreso de la Unión, denominado Ley de Eficiencia Energética. En este documento, entre muchas otras cosas, se pretende hacer obligatorio en los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), el establecimiento de programas de ahorro, conservación y uso eficiente de energéticos primarios y secundarios, susceptibles de medirse lo cual sería parte de las funciones de la Secretaría de la Contraloría y Desarrollo Administrativo; se asignarían recursos presupuestales a las dependencias gubernamentales que necesiten partidas adicionales en los rubros de inversión o de gasto corriente. Se establecerían además estímulos fiscales a personas físicas o morales que destinaran recursos económicos a la adquisición y operación de aerogeneradores, paneles solares, calentadores solares, mini esquemas hidroeléctricos y, en general, cualquier fuente renovable de energía.

Finalmente, no podemos soslayar el aspecto ambiental, hemos sido testigos de un invierno 97/98 totalmente atípico, hubo inundaciones y tormentas de nieve poco usuales en el territorio nacional y por lo que se refiere al verano de 1998, se han tenido temperaturas por arriba de los 35°C en el altiplano mexicano, lo cual no se había observado desde la década de los años 20. En el norte del país, en Mexicali, los termómetros han alcanzado los 50°C a la sombra y en Monterrey la temperatura más elevada al mes de mayo alcanzó los 48°C.

Ha habido incendios forestales a todo lo largo y ancho del territorio nacional, el humo de dichos incendios ha llegado a los estados de Texas y Florida en la Unión Americana y se han tenido que rentar aviones cisterna para combatir los incendios forestales. Los problemas de contaminación, asociados con estos incendios forestales han obligado a las autoridades a

tomar medidas emergentes para salvaguardar la integridad física de niños, ancianos y personas con afecciones respiratorias.

Sin duda, los cambios climáticos que se han venido experimentando a nivel mundial tienen su origen en el uso indiscriminado de combustibles fósiles para la satisfacción de las crecientes necesidades energéticas del mundo. De no revertirse esta tendencia, los daños ecológicos irán en aumento y mucho de ellos serán irreversibles.

Este documento pretende despertar una conciencia nacional para encontrar nuevas formas de energía que no dañen el ecosistema del cual dependemos para la subsistencia de la especie humana.





# BIBLIOGRAFÍA

- “A Guide to the Photovoltaic Revolution” Maycock & Stirewalt, Rodale Press, EUA, 1985.
- “Minicentrales Hidroeléctricas” Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales, IDAE, Madrid, 1992.
- “Energía Eólica”, Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, 1992.
- “Energía Solar Térmica”, Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, 1992.
- “Compendio Estadístico del Sector Energía 1980-1997” Secretaría de Energía, México, 1998.
- “Consumer Guide to Solar Energy”, Sklar & Shienkopf, Bonus Books, EUA, 1991.
- “Wind Energy and the Environment”, Barak & Swift, IEE Energy Series, London, UK, 1989.
- “Alternative Energy Handbook”, Rosenberg Paul, Prentice Hall, EUA, 1993.
- “Ingeniería de la energía solar”, Almanza & Muñoz, El Colegio Nacional, México, 1994.
- “Options for Rural Electrification in Mexico”. Gutiérrez Vera Jorge, IEEE Transactions on Energy Conversion, Sep/1992, Volume 7, Number 3, (ISSN 0885-8969).
- “Use of Renewable Sources of Energy in Mexico, Case: San Antonio Agua Bendita”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Sep/1994, Volume 9, Number 3, (ISSN 0885-8969).
- “Innovative Energy & Environmental Applications”, Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Energy Engineering Congress, EUA, 1992.
- “La basura es la solución”, Deffis Caso Armando, Editorial Concepto, México, 1989.
- “Integrated Solid Waste Management”, Tchobanoglous & Theisen & Vigil, Mc Graw Hill, EUA, 1993.
- “The Mc Graw-Hill Recycling Handbook”, Lund Herbert, E. Mc Graw-Hill, EUA, 1993, Monterrey, NL. Noviembre de 2001.