

104
2e;



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ENERGIA SOLAR, EOLICA, BIOMASA
Y APLICACIONES

TRABAJO MONOGRAFICO DE ACTUALIZACION

Que para obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a

JOSE JAIME MORALES RODRIGUEZ

ASESOR:

I.Q. RODOLFO TORRES BARRERA



México, D.F.
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

CAPITULO		PAGINA
I	INTRODUCCION	1
II	ANTECEDENTES HISTORICOS	3
III	GENERALIDADES	5
	1) El Sol	"
	2) El Viento	12
	3) La Biomasa	19
	4) Fuentes de Energía	22
	5) Panorama Energético	24
IV	LOS PROBLEMAS DE LA ENERGIA DE HOY	27
	1) La Crisis de los Energéticos	"
	2) Dependencia del Petróleo como Principal-Fuente de Energía	28
	3) La Contaminación Térmica	29
	4) La Contaminación del Aire	30
	5) La Contaminación del Agua	33
	6) La Inversión Térmica	34
V	PROCESOS DE TRANSFORMACION DE LA ENERGIA	36
	1) Procesos de Transformación de Energía Solar-Directa	37
	2) Procesos de Transformación de Energía Solar-Indirecta	58
VI	APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR DIRECTA	78
	1) Transformación Térmica	"
	2) Generación Fotovoltaica de Energía Eléctrica	96
	3) Aplicaciones Fotoquímicas	101

CAPITULO		PAGINA
VII	APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR INDIRECTA	103
	1) Energía del Viento o Eólica	"
	2) Energía de Biomasa	114
VIII	ALMACENAMIENTO DE ENERGIA	120
	1) Forma Biológica (Fotosíntesis)	"
	2) Forma No-Biológica	121
IX	EJEMPLOS DE DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS :	130
	FOTOVOLTAICO (ENERGIA SOLAR)	
	AEROGENERADOR (ENERGIA EOLICA)	
	DIGESTOR (ENERGIA DE BIOMASA)	
X	CONCLUSIONES	164
XI	BIBLIOGRAFIA	167

CAPITULO I

INTRODUCCION

En la actualidad, la actividad petrolera está ligada muy estrechamente a los movimientos sociales y políticos mundiales, a través de distintas épocas y tiene una relevancia vital en el aspecto económico. La mayoría de los países tienen problemas de abastecimiento de petróleo y pagan un alto porcentaje de sus ingresos para disponer de este energético.

Una de las posibles soluciones al problema es impulsar las aplicaciones sobre fuentes alternas de energía, para no depender casi exclusivamente del petróleo, y poder así, racionalizar la principal fuente de energía no renovable.

En México, es necesario aprovechar la situación geográfica para una adecuada utilización de los recursos energéticos como son: sol, viento y plantas, etc., con la ayuda de los recursos humanos técnicos para poder llevar a cabo investigaciones en el área de fuentes alternas de energía.

Los recursos renovables mencionados se deben aprovechar para generar energía o materiales que a su vez puedan generarla además de que cuentan con una ventaja muy importante que es la de no contaminar como lo hacen la mayoría de las actuales fuentes de energía.

Para contribuir a una mejor comprensión de los problemas técnico sociales que conlleva utilizar la energía solar directa e indirecta (eólica, biomasa) se llevó a cabo una investigación bibliográfica lo más actualizada posible de los usos y aplicaciones

de estos tipos de energía, esto es importante debido a:

- 1) El progresivo deterioro ambiental que significa la explotación y el uso de fuentes de energía convencional.
- 2) La urgencia de aumentar la producción y el empleo en las zonas rurales.

Esta investigación bibliográfica ofrece un panorama sobre logros, limitaciones y perspectivas de la energía solar directa e indirecta, partiendo de un repaso histórico para dilucidar el conocimiento que se tenía acerca de estas fuentes de energía.

Se analizan también los principales problemas que surgen de la utilización y dependencia de las fuentes convencionales de energía, como lo es la contaminación del aire y agua; y para minimizar esta problemática se proponen diversos usos y aplicaciones, así como, algunos ejemplos a fin de que sirvan como guía -- para dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos solares, eólicos y de biomasa.

Posteriormente se concluirá que para un mejor aprovechamiento de las fuentes alternas de energía en estudio se deben de proporcionar adecuadas formas de almacenamiento para asegurar un suministro continuo.

El desarrollo de las aplicaciones de la energía solar directa e indirecta, el cual es el principal objetivo de este trabajo, no significa el comienzo de un nuevo orden económico; por el contrario, los nuevos sistemas de energía deben ser competitivos con el petróleo, ya sea por el agotamiento de la fuente convencional de energía, o debido a la contaminación del medio ambiente o simplemente por sus costos.

C A P I T U L O I I

ANTECEDENTES HISTORICOS

La energía se encuentra en torno a nosotros por todas partes y se manifiesta de diferentes formas: calor, luz, sonido, magnetismo y gravedad, movimientos y todas las funciones vitales.

Las anteriores formas de energía hacen posible la vida humana sobre la tierra estableciendo el estilo de vida, el equilibrio ecológico, el desarrollo o subdesarrollo, el avance tecnológico e industrial. Además el hombre necesita energéticos para llevar a cabo sus actividades cotidianas, por ejemplo; en la casa, para iluminar, refrigerar, calentar agua y cocinar; en la industria para elaborar alimentos, hierro, acero, materiales de construcción y computadoras; en el campo, para bombear agua, irrigar, producir fertilizantes y cosechar; en el transporte, para suministrar combustible a los vehículos que nos llevan al trabajo, a la escuela o a la luna (29).

El primer uso que el hombre le dió al sol como fuente directa de energía apareció cinco siglos después del descubrimiento de la electricidad por Thales de Mileto. Arquímedes en el año 212 a.c. incendió la flota romana por medio de "vidrios que quemaban" (6).

Las transformaciones de las fuentes de energía producen cambios sociales como, por ejemplo, en el siglo XVIII en Europa se aceleró la Revolución Industrial, por lo cual las fuentes alternas de energía (sol, madera, viento) fueron desplazadas por el carbón y más recientemente por el petróleo para satisfacer princi

palmente las necesidades industriales y urbanas. El sol fué desplazado porque los nuevos combustibles aportaban más energía por unidad de producción, aparte de que eran fáciles de transportar y almacenar (29).

En la actualidad se considera que ya no habrá un solo - energético que domine, sino que deberá emplearse una combinación de diferentes energéticos para satisfacer el desarrollo social y económico de la humanidad. Así tenemos que alrededor de la quinta parte de toda la energía que se usa actualmente en el mundo - proviene de recursos solares, fuerza del viento, fuerza del agua, biomasa y luz del sol directa.

Hacia el año 2000 estas fuentes de energía renovables podrán proveer el 40% del total de energía requerida. En el año - 2025 la humanidad podrá obtener de los recursos naturales el 75% de sus demandas de energía (19), y así las diferentes fuentes verán su desarrollo en las diferentes regiones, por ejemplo, la capacidad de la fuerza del viento es mayor en las zonas de clima extremoso, mientras la biomasa florece en los trópicos, la luz del sol directa es más intensa en los desiertos sin nubes, mientras que la fuerza hidráulica depende de la lluvia en las montañas, - la geotérmica en la fisión nuclear que ocurre en el interior de la tierra, la de las mareas en el acumulamiento de agua en una bahía durante la marea alta y dejarla escapar cuando baja la marea, accionando una turbina (19).

CAPITULO III

GENERALIDADES

1) El Sol

1.1) Características

El sol es una masa con atmósfera caliente de 1.39 millones de kilómetros de diámetro, cuya distancia media a la tierra es de 150 millones de kilómetros. La distancia mínima (en el perihelio) se alcanza alrededor del 15 de enero, mientras que la máxima (en el afelio) se tiene a fines de Junio (25).

A pesar de la estructura solar tan compleja, será suficiente considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura de 5489 °C. Es un espectro casi continuo desde aproximadamente 200 nanómetros ultravioleta a 3000 nanómetros infrarrojo, con un máximo de aproximadamente a 500 nanómetros.

La radiación electromagnética es transmitida por medio de ondas. A su vez la longitud de onda nos indica una energía en una relación inversa, esto es: a mayor longitud de onda nos corresponde una menor energía.

La cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación en el espacio, y a la distancia media del sol a la tierra recibe el nombre de constante solar, I_{CS} , y su valor nominal o estandar es de 1353 watts/m² (25).

La actividad de las "manchas" solares puede modificar la producción de energía en el sol mismo en aproximadamente 2% y se da una variación de aproximadamente 3.5% debido a la variación de

la distancia entre la tierra y el sol.

Al entrar la radiación solar en la atmósfera; es absorbida, reflejada o desviada, de manera que del total interceptado por la tierra sólo alrededor de la mitad de la radiación llega a la superficie terrestre en dos componentes; directo y difuso.

La radiación directa es aquella que no experimenta cambios en su dirección, la radiación difusa es la que sufre dispersión en la atmósfera y no tiene una dirección única o preferente.

La proporción de radiación directa y difusa depende de la nubosidad, humedad, presencia de partículas suspendidas en la atmósfera y otras condiciones ambientales, pudiendo llegar a corresponder a la radiación difusa desde 10% a 85% de la global, siendo esta proporción menor en zonas tropicales (1).

1.2) Medición de la Radiación Solar

El estudio de la radiación global que alcanza la superficie de la tierra supone un cierto número de medidas y, principalmente, la medida de la duración de la insolación. Estas mediciones se efectúan con instrumentos que convierten la radiación solar a otra forma de energía, dando como resultado una medida o lectura proporcional a la intensidad de la radiación (1,25).

El instrumento más común, conocido como Piranómetro, se emplea para registrar la radiación global dentro de su campo de vista hemisférico. La señal eléctrica generada puede servir para obtener gráfica o digitalmente, la radiación solar como función del tiempo.

El Pirheliómetro sirve para medir la radiación directa -

normal que proviene del sol, además, éste instrumento cuenta con un dispositivo electrónico que le permite seguir al sol en forma continua.

Los Difusómetros son generalmente Piranómetros con una -- banda o disco de sombra que permite al sensor detectar la radiación directa midiendo por tanto sólo la componente difusa.

El Heliógrafo de Campbell-Stockes mide las horas de asoleamiento en un lugar específico, éste instrumento está constituido por una lente esférica que produce una imagen del sol sobre papel tratado químicamente. El papel se quema cuando el valor de la radiación está por arriba de 120 watts/m^2 . La longitud del papel quemado es un índice del número de horas de sol brillante y proporciona los intervalos de tiempo en el día en que la radiación está por arriba de un mínimo establecido (25).

1.3) La Información Solar

Insolación es la cantidad de energía luminica por unidad de área que cae diariamente sobre la superficie de un lugar (34). En sistemas fotovoltaicos es común expresarla en:

$$\text{kw-hr/m}^2 \cdot \text{día}$$

A menudo la información se encuentra expresada en:

$$\text{cal/cm}^2 \cdot \text{día} = \text{Langleys}$$

Ejemplo: La insolación en verano en Sonora es de $5 \text{ kw-hr/m}^2 \cdot \text{día}$.

Horas-Pico

La insolación máxima al nivel del mar, cuando el sol está en el zenith de un día despejado es de 1 kw/m^2 .

Por cada hora que el sol esté en dicho pico caerá ---

1 kw-hr/m² de energía, en la superficie de la tierra.

La energía que cae durante todo el día se puede expresar como el número de horas equivalentes a que el sol hubiera estado en el pico, y se denomina horas-pico (34).

$$\text{No. horas-pico} = \frac{\text{No. kw-hr/m}^2 \cdot \text{día}}{1 \text{ kw-hr/m}^2}$$

Es decir, el número de horas-pico; es el número de kw-hr/m² día que caen en un lugar.

Ejemplo, la insolación en Verano en Sonora es de 5 horas-pico.

Orientación

El sol sale en dirección ESTE y se oculta en dirección OESTE. En el hemisferio NORTE la trayectoria ESTE-OESTE del sol se "acuesta" en dirección al SUR hacia los meses de Invierno.

En Verano la trayectoria se "levanta" siendo casi perpendicular a la superficie terrestre.

En Invierno el sol sale en dirección SUR-ESTE y se oculta en dirección SUR-OESTE. En ambos casos el punto ocurre a 23° con relación al ESTE y OESTE respectivamente.

Insolación en el Año

En general la insolación en el plano horizontal es mayor en Verano cuando el sol cae a plomo, que en Invierno donde los rayos de luz llegan inclinados. Esto puede no ser cierto para -- aquellos lugares en que la época de nublados ocurre en Verano.

Para que la insolación en una superficie no sea tan baja en Invierno se puede inclinar hacia el SUR para que los rayos de-

luz caigan con un ángulo más cercano a la perpendicular. Con ello se disminuye también la insolación que cae en Verano. Se logra así hacer más plana la variación de la insolación a lo largo del año. No se debe exagerar la inclinación pues entonces en Verano - la captación sería muy pobre (34).

La regla general es: inclinar el captador solar respecto a la horizontal a un ángulo de: $10^{\circ} + \text{latitud del lugar}$

Por otra parte, para efectos de cálculos se emplea el esquema de la figura No. 1, el cual muestra el número de horas-pico y la inclinación del módulo solar para las diferentes zonas del país (34).

NOTAS: Se ha considerado el mes más nublado del año, para asegurar el funcionamiento de los equipos en cualquier época.

Ya está incluido un sobredimensionamiento del 10% en el número de horas pico como factor de seguridad en las estimaciones.

UNIDADES: HORAS-PICO

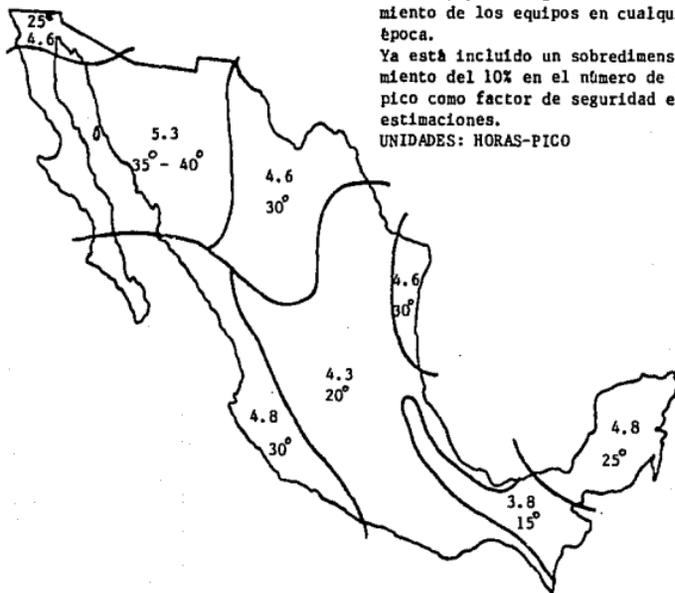


Figura No. 1. Mapa de Insolación de México Aplicable a Sistemas Fotovoltaicos (34).

1.4) Disponibilidad de la Radiación solar

Como se muestra en la figura No. 2, la tierra recibe energía radiante a un régimen de 173×10^{15} watts. Aproximadamente el 30% de la radiación entrante se refleja sin cambio en la longitud de onda. Aproximadamente el 47% es absorbido por la atmósfera y la superficie de la tierra, provoca un incremento en la temperatura y seguidamente se irradia de nuevo hacia el espacio. Unicamente el 23% restante penetra en el sistema terrestre y pasa a ser la fuerza motriz de vientos, corrientes, olas, moldea nuestro clima y da lugar al ciclo hidrológico(44).

Solamente un 0.02% del total, o sea 40×10^{12} watts, penetra en el sistema biológico por fotosíntesis en las plantas y -- otros organismos.

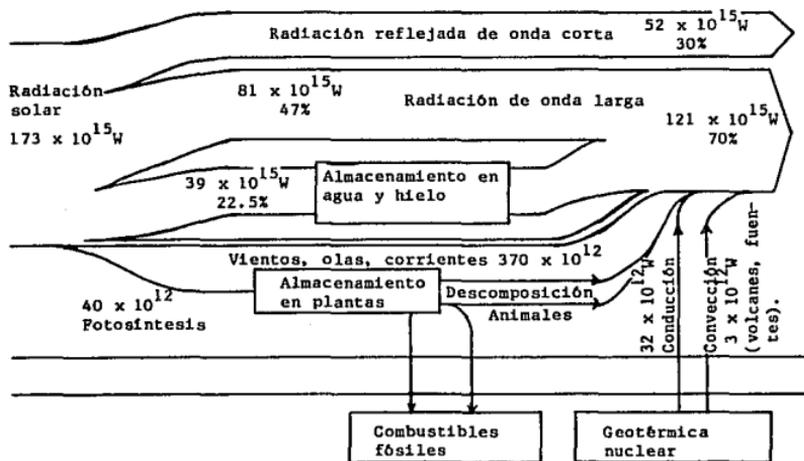


Figura No. 2. Flujo de Energía por el Sistema Terrestre (44).

En México, la disponibilidad de energía solar es alta en comparación con el resto del mundo, en virtud de que se encuentra dentro del cinturón de insolación anual máxima, formado por los paralelos 35° N Y 35° S. México recibe el 44% de la energía solar incidente en los Estados Unidos, no obstante que ocupa el 20% de su extensión territorial (16).

Las zonas de la Península de Yucatán son las más favorecidas con la radiación solar, alcanza 8 kw-hr/m². día en Verano y su componente directo es muy alto. La menor incidencia se registra en los Estados de la Vertiente del Golfo de México; 3.5 kw-hr/m². día en los meses menos soleados de Invierno, con una mayor proporción de radiación difusa (16,25).

2) El Viento

2.1) Características

Una parte de la energía de radiación solar que llega a la tierra se transforma en energía cinética de los gases de la atmósfera, cuyas moléculas están siempre en movimiento. Por lo tanto, el Viento es el movimiento natural del aire atmosférico y tiene un sentido horizontal sobre la tierra.

La energía eólica tiene como ventajas la de ser inagotable, gratuita y no lesiva al medio ambiente, pero cuenta también con los grandes inconvenientes de ser dispersa y aleatoria (18).

Bajo la acción de las presiones, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento. El gradiente de velocidades será mayor cuanto -

mayor sea la diferencia de presiones. El viento sopla desde la zona de altas presiones a las zonas de bajas presiones y su movimiento está influenciado por el giro de la tierra.

Las causas principales del origen del viento son: la radiación solar, que es más importante en el Ecuador que en los Pólos, la rotación de la tierra, que provoca desviaciones hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Sur, y las perturbaciones atmosféricas (18).

Por lo tanto, el viento es una consecuencia de la radiación solar. Las diferencias de insolación entre los distintos puntos del planeta generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura, se traducen en variaciones de presión -- (14).

Durante el día, el agua de los océanos permanece más fría que la superficie terrestre. De la radiación solar que incide -- sobre la superficie del agua, parte se usa para calentamiento y -- parte en evaporación, pero debido a la gran capacidad del agua -- para absorber calor, la temperatura en las capas superficiales, apenas varía y lo mismo ocurre con la temperatura del aire que se encuentra en contacto con ellas (5).

Sobre la tierra, en cambio, la radiación solar que se -- recibe sobre el suelo se traduce en una elevación de la temperatura, tanto de la corteza como del aire circundante. El aire caliente se dilata, pierde presión y es reemplazado por el aire -- fresco que viene del mar. Durante la noche el ciclo se invierte, la corteza terrestre se enfría más rápidamente, mientras que el -- agua del mar conserva mejor el calor acumulado a lo largo del --

día. En las montañas ocurre un proceso parecido. Unas laderas reciben más insolación que otras, debido a su orientación y pendiente, el calentamiento del suelo es desigual y los desplazamientos del aire tienden a compensar las diferencias de presión.

En la superficie terrestre, el movimiento horizontal del aire es modificado, tanto en dirección como en magnitud, según la topografía del terreno sobre el que pasa, la figura No. 3 muestra esta situación.

También puede suceder que dos lugares muy próximos tengan una gran diferencia de condiciones eólicas. Los valles y las zonas entre montañas afectan al citado potencial al aumentar considerablemente la velocidad del viento, que varía con la altura (5).

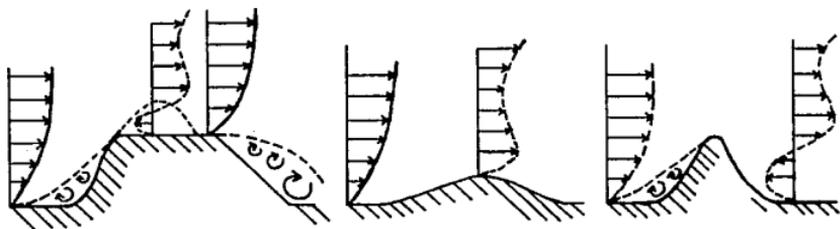


Figura No. 3. Variación típica de la velocidad del Viento en función de la altura para diferentes topografías-
(5).

2.2) Medición de la Velocidad del Viento

La velocidad del viento se expresa en nudos, un nudo es igual a una milla marina por hora ó 0.51 metros por segundo.

La velocidad del viento en superficie es raramente constante durante un intervalo de tiempo, por corto que sea; en general varía rápida y continuamente.

La turbulencia del viento produce variaciones que son irregulares en período y amplitud. En la mayoría de los casos, se necesita conocer la velocidad media del viento.

Se ha convenido que hay calma cuando la velocidad del viento es inferior a un nudo.

Se llaman anemómetros los instrumentos que se utilizan para medir la velocidad del viento en superficie. Existen dos tipos principales y son los siguientes:

a) Anemómetros Rotatorios

De éste tipo el más utilizado para medir la velocidad del viento es el anemómetro de cazoletas. Este instrumento lleva normalmente tres cazoletas que están montadas en soportes equidistantes y perpendiculares al eje vertical. La fuerza ejercida por el viento es mucho mayor en el interior que en el exterior de la cazoleta, lo que hace que éstas giren. La velocidad de rotación es aproximadamente igual a la velocidad del viento a condición de que éste sea siempre suficientemente intenso para mantener las cazoletas en movimiento.

b) Anemómetros a Presión.

Consideremos un tubo abierto en uno de sus extremos y cerrado en otro, si se mantiene este tubo horizontalmente de manera

que el extremo abierto dé la cara al viento, la presión del aire en el interior del tubo aumenta en función de la velocidad del viento. Considérese ahora un tubo semejante al anterior, pero que lleva además varios "agujeritos" en fila. Si éste tubo se mantiene verticalmente de manera que el viento sople en los "agujeritos", la presión en el interior del tubo disminuye. Se produce un fenómeno de aspiración.

En el anemómetro tubular de presión, las diferencias de presión producidas de ésta forma se utilizan para medir la velocidad del viento.

La forma más sencilla para medir la velocidad del viento es la observación directa del efecto del viento en la superficie terrestre sin utilizar instrumentos. La escala Beaufort, establecida en 1905 por el Almirante Sir Francis Beaufort con objeto de estimar la velocidad del viento en el mar, ha sido más tarde adoptada para ser utilizada en tierra. Después se le añadieron equivalencias en velocidad del viento para cada clase de efectos observados.

Los instrumentos de medida y registro de la velocidad del viento han reducido considerablemente la utilización de la escala Beaufort, particularmente para las estaciones terrestres. Sin embargo, constituye un medio cómodo para estimar la velocidad del viento a falta de otros procedimientos (18).

2.3) Disponibilidad de la Energía del Viento en la República Mexicana.

Con el objeto de proporcionar información sobre la energía disponible, facilitar la selección del sitio y permitir definir rangos apropiados de operación de los sistemas de conversión de energía eólica, en la actualidad el Instituto de Investigaciones Eléctricas por medio del Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía ha realizado estudios de la velocidad del viento que rige en el País. La tabla siguiente muestra los datos de la velocidad media anual de algunos sitios de la República Mexicana (*).

LOCALIDAD	VELOCIDAD MEDIA ANUAL DEL VIENTO (m/seg)
Isla Guadalupe, BCN.	6.1
La Paz, BCS.	3.5
Puerto Cortéz, BCS.	2.0
Campeche, Camp.	2.8
Nuevo Casas Grandes, Chih.	2.8
Pachuca, Hgo.	4.4
Tulancingo, Hgo.	2.7
Salina Cruz, Oax.	5.0
Veracruz, Ver.	4.8
La Bufa, Zac.	5.3
Ensenada, BCN.	1.1
Chihuahua, Chih.	1.7

Tabla No.1. Velocidad Media Anual de Algunos Sitios de la República Mexicana (*).

(*) Datos proporcionados por el Ing. Ricardo Saldaña Flores; Investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Depto. de Fuentes No Convencionales de Energía. Febrero de 1993. Cuernavaca, Morelos.

La tabla No. 1 da una idea de los sitios del país con mayor eolicidad y que pueden ser aprovechados para propósitos de potencia del viento.

Como conclusión general se puede decir que la región del extremo norte de la ciudad de Zacatecas, junto con el sur del Istmo de Tehuantepec, presentan un amplio potencial para la generación de cientos de miles de kilowatts-hora de electricidad. Son también importantes por su potencial eólico el extremo Nororiente de la Península de Yucatán, las mesetas altas de Tlaxcala e Hidalgo, la región limítrofe entre Guanajuato y Michoacán, la Península de Baja California, y las planicies costeras del país (40).

Además de los mapas eólicos los cuales nos porporcionan una información global sobre el nivel medio de los vientos en una determinada área geográfica, situándonos las zonas más idóneas - desde el punto de vista energético, es necesario disponer de información meteorológica detallada sobre la estructura y distribución de los vientos en función de su velocidad, ésta información nos debe permitir elaborar:

1) Distribuciones de Velocidad

2) Perfil de Velocidades

1) Distribución de Velocidades

La función de distribución de velocidades nos proporcionan el número de horas al año en que la velocidad del viento es superior a un valor determinado. Con esta información y conociendo los parámetros de operación de una aeroturbina se puede evaluar la ganancia energética anual que puede generar.

La curva de distribución de velocidades se obtiene por procedimientos estadísticos a partir de mediciones tomadas en el lugar del emplazamiento. De forma aproximada se pueden ajustar analíticamente unas funciones de distribución que suelen dar buenos resultados. Las más utilizadas en aplicaciones eólicas son la distribución de Weibull y la de Rayleigh (5).

2) Perfil de Velocidades

El perfil de velocidades nos da la variación de la velocidad del viento a medida que ganamos altura respecto al suelo. La fuerza del rozamiento y el efecto de frenado debido a las irregularidades del terreno son más intensos en las capas que se encuentran en contacto con el terreno.

3) Biomasa

3.1) Características

Se denomina biomasa a cualquier material orgánico formado por la fotosíntesis y la energía que de ella puede extraerse, depende principalmente del contenido de carbohidratos que suelen aparecer como azúcares y celulosa (29).

La fotosíntesis es la síntesis de elementos químicos y energéticos mediante la luz del sol, vía fotones que permiten la transformación en materias orgánicas energéticas de productos minerales sin valor energético, gas carbónico, agua y sales. Esta fotosíntesis constituye el origen del crecimiento del conjunto de vegetales y de los combustibles renovables (13).

Los factores que influyen sobre el rendimiento de conversión de la fotosíntesis son:

- El calor solar (es indispensable, pero si es demasiado

fuerte puede frenar la asimilación).

- La luz (resulta indispensable hasta una cierta intensidad).
- La presencia de clorofila (es indispensable).
- Gas carbónico (es necesario).
- El agua (es indispensable, ya que conduce al oxígeno).

Los vegetales emplean la energía solar, pero con un rendimiento muy bajo, puesto que una hoja que absorba 1.7% de la energía solar que recibe, produce alrededor de 1 gramo de materia seca por m^2 de hoja y por hora cuando el sol suministra alrededor de 1 kilowatt-hora (Kwh).

Algunos planctons y algas dan rendimientos de 3 a 4%, -- mientras que la media para los vegetales es de 0.4% de la energía luminosa incidente (13).

La materia orgánica que se produce por la reacción de fotosíntesis, es energía o trabajo almacenado, cuyo tiempo de almacenaje depende del vegetal. Esta energía almacenada puede recuperarse en diversas formas; gas, alcohol, etc..

3.2) Disponibilidad de Energía de Biomasa

Como se mencionó en el punto 1.4, página #11, de los 173-x 10^{15} watts de radiación solar que recibe la tierra sólo el -- 0.02%, es decir, 40×10^{12} watts se aprovechan en el sistema biológico por fotosíntesis (45).

Estimaciones sobre la producción mundial de biomasa señalan valores entre 140×10^9 y 160×10^9 ton./año (1). El conteni-

do energético de la materia producida anualmente por fotosíntesis representa alrededor de 10 veces el consumo mundial de energía (1).

El recurso biomásico se puede clasificar de la siguiente manera (7):

a) Producido

a.1) Terrestre

a.1.1) Leñoso

a.1.2) Herbáceo

a.2) Acuático

a.2.1) Emergente

a.2.2) Flotante

a.2.3) Sumergido

b) Residual

b.1) Forestal

b.2) Agrícola-ganadero

b.3) Industrial

b.4) Urbano

La biomasa producida es la cultivada con la intención última de obtener energía (7); por ejemplo, se puede citar a la caña de azúcar de la cual se puede producir etanol, o las algas -- acuáticas empleadas para producir metano como combustible.

La biomasa residual es la procedente de las explotaciones de los bosques, del agro y ganadería, de la industria y de los núcleos urbanos, aquí podemos mencionar a los residuos vegetales, - animales y humanos que mediante su fermentación anaeróbica se puede producir el biogas (7).

En México existe una gran variedad de tipos de suelos y, por ende, de tipos de biomasa producidos o susceptibles de producirse (1).

Las montañas cubren 86% de la superficie de México. Dos cadenas cruzan el país de norte a sur y se unen en el estado de Oaxaca.

El trópico de Cárncer divide al país en zonas climáticas una moderada al norte y la tropical en el sur. La gran variación de altitud, con menor de una tercera parte de territorio bajo los 500 metros sobre el nivel del mar, produce la variedad de condiciones climáticas del calor ecuatorial en los bosques de Tabasco al frío de las montañas. El 60% del país es seco y tan sólo 13% tiene una pluviosidad abundante durante el año

Hay tres tipos de vegetación forestal, el desértico que se encuentra en el norte del país, donde hay poca lluvia, el tropical que se encuentra en el sureste y consta sobre todo de madera ordinaria, dura y suave y el tercer tipo que es el conífero, sobre todo pino, abeto americano, enebro común, cedro y encino (48).

Debido a la gran variedad de climas y por ende de suelos, el 70.7% de la superficie del territorio nacional ($1'385,198 \text{ km}^2$) se clasifica como arable, es decir, susceptible de algún tipo de explotación productiva (1).

4) Fuentes de Energía

Todos los procesos físicos observados en nuestro Universo pueden explicarse por la interacción de cuatro tipos de fuerzas: la gravitatoria, a la que son sensibles todos los cuerpos que tie

nen masa; la electromagnética, que actúa entre cuerpos con carga eléctrica; la fuerza nuclear fuerte, que constituye el cemento - que liga entre sí a los componentes de los núcleos atómicos; y la fuerza nuclear débil, importante para explicar los fenómenos de - la evolución del Universo (37). Se puede afirmar que tales fuerzas son las originarias de todos los intercambios energéticos, lo que equivaldría a considerarlas como las primigenias fuentes de - energía, pero es preferible centrarse en los modos energéticos a los que estamos acostumbrados por experiencias casi directas o - por la rutina histórica que ha ido conformando ciertos tipos de - aplicaciones energéticas satisfechas con determinadas fuentes de energía.

En seguida se enlistan algunas fuentes de energía (37):

- Biomasa
- Combustible fósiles (carbón, petróleo, gas natural)
- Eólica
- Hidráulica
- Geotérmica
- Energías marinas (oleaje, gradientes térmicos, mareas)
- Energía solar (heliotérmica, fotovoltaica, fotoeléctrica y fotoiónica)
- Energía nuclear (fisión y fusión)

De las anteriores fuentes de energía las que se estudian en este trabajo son las de biomasa, la del viento y la solar (directa), debido las características climáticas de nuestro país, - al relativo bajo costo de los materiales usados para efectuar la conversión y almacenamiento en comparación con los que emplean -

otras fuentes de energía (geotérmica, maremotriz, nuclear), por su baja peligrosidad, alta disponibilidad y a la nula contaminación ambiental.

5) Panorama Energético

5.1) Consumo mundial de Energía

Todo el siglo XIX transcurrió con un gran uso del carbón, cuyas características marcaron el modelo económico social de la época. La localización de yacimientos carboníferos facilitó el aprovisionamiento energético de los centros de consumo hasta las primeras décadas del siglo actual, en que el petróleo acabó por imponerse como medio insustituible para alimentar los motores de combustión interna, de eficacia técnica superior a los de vapor (5).

La demanda de energía total en el mundo adopta la de la figura No. 4. Esto representa una estimación aproximada del trabajo real desempeñado por las máquinas fabricadas por el hombre junto con la energía utilizada en los procesos químicos y en calefacción (4).

En la actualidad la demanda energética es calculada mediante el análisis de las tendencias del pasado, y su proyección hacia el futuro.

Las necesidades energéticas de los países con un grado de tecnificación menor (zonas en desarrollo) y las necesidades energéticas de la civilización, presentan una tendencia creciente, a la vez que se agotan las reservas petrolíferas y de carbón.

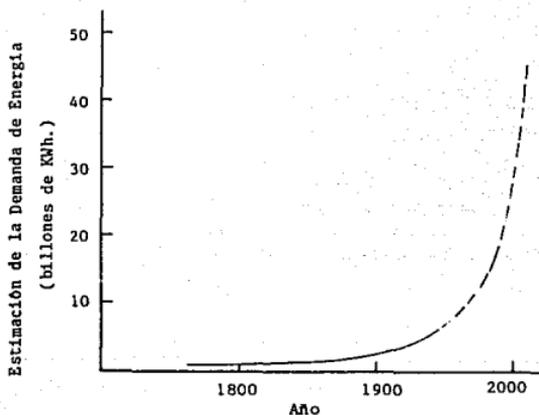


Figura No. 4. Estimación de la demanda Mundial de Energía, 1800-2000 (4).

En los países desarrollados, la mitad del consumo energético se debe al consumo de las calefacciones y del agua caliente, para ello, se consumen millones de toneladas de combustible destinadas a la calefacción de oficinas y fábricas. Pero ésta se puede conseguir con colectores solares de diferentes tipos (6).

11.2) Consumo de Energía en México

El proceso de desarrollo en México se ha caracterizado -- por un alto consumo de energía por unidad de producto general, y al igual que en otros países se hace un uso ineficiente de los energéticos.

El incremento en la utilidad del uso de la energía se explica por el cambio cualitativo observado en la estructura produc

tiva del país y el deterioro relativo de los precios internos de los combustibles. En los últimos veinte años se desarrollaron industrias básicas altamente consumidoras de energía, además se incrementaron los transportes por carreteras que influyó en un mayor consumo de combustibles.

Hasta 1970 el país fué prácticamente autosuficiente en recursos energéticos. Un consumo que crecía a una tasa más elevada que la oferta nacional hizo que entre 1970 y 1973 se importasen - cantidades cada vez mayores, aunque aún relativamente pequeñas de petróleo y carbón.

Con los descubrimientos de petróleo en el sureste del - país, se recuperó la autosuficiencia energética y se convirtió en exportador importante de hidrocarburos y, hasta la fecha, esto - constituye la principal fuente de energía primaria del país (casi el 90% del total) y el renglón por el que se obtienen la mayor - cantidad de divisas (6).

C A P I T U L O I V

LOS PROBLEMAS DE LA ENERGIA DE HOY

En la actualidad, la sociedad industrial depende por completo de los combustibles fósiles. Estos se han depositado en la tierra durante un período de alrededor de 600 millones de años, y el hombre extrae un volumen cada vez mayor.

Existen límites para las cantidades de combustibles que se pueden extraer; es decir, los combustibles fósiles no son recursos renovables, ya que se forman con suma lentitud y una vez que se utilizan no se pueden emplear de nuevo (10).

Por el momento no hay un déficit total de energía en el mundo tomando en cuenta los grandes yacimientos de carbón, petróleo y uranio, sino más bien, existe un déficit muy notorio de energía "limpia".

Por lo tanto, los problemas de la energía de hoy, son: la crisis de energéticos, la contaminación térmica y en sus diferentes manifestaciones, la inversión térmica y la dependencia del petróleo como principal fuente de energía.

1) La Crisis de los Energéticos

La preocupación nacional ha crecido respecto a lo que se ha venido llamando "la crisis de energéticos". El problema gira alrededor de los decrecientes abastecimientos de las fuentes nacionales de energía y la demanda cada vez mayor de ésta. El problema de la oferta y la demanda no ha alcanzado un punto crítico todavía en potencia con base en la demanda de energía, que aumenta a un ritmo de más del 4% anual (10).

El primer impacto que causo el petróleo a fines de 1973 y principios de 1974, marcó el final del petróleo seguro y barato. Los productores árabes de petróleo embargaron a los Estados Unidos, redujeron la producción total y los embarques a otros países. Por primera vez los miembros de la O.P.E.P. dejaron de negociar - un precio con las compañías petroleras, ellos en cambio establecieron el precio unilateralmente sobre bases definitivas. Los compradores de petróleo no tenían alternativas y lo aceptaron, pagando un precio más alto ,ocho veces más alto a fines de 1974 que -- cinco años antes. Y así, los países exportadores de petróleo definieron una nueva época para el resto del mundo, una época de abastecimientos inciertos de petróleo costoso.

La crisis del petróleo de 1973-1974, constituyó un punto vital en la historia de la postguerra, al asestar un golpe poderoso económico y político al mundo entero. Esto interrumpió o quizá detuvo permanentemente el crecimiento económico de la postguerra y puso en marcha un cambio drástico en el poder mundial.

No existe un remedio fácil para resolver la crisis de -- energéticos. Sin embargo, las soluciones surgirán del reconocimiento y comparación de una serie de beneficios y riesgos, de posibilidades y obstáculos.

2) La Dependencia del Petróleo como Principal Fuente de Energía

En 1970, unos 111 años después del nacimiento de la industria petrolera de los Estados Unidos, la producción interna llegó a su máximo nivel y empezó a declinar. Pero la demanda de petróleo continuó apareciendo y ésta sólo podía satisfacerse con más y

más petróleo del Medio Oriente, lo que significaba una dependencia cada vez mayor y una creciente vulnerabilidad.

Si las naciones industrializadas continúan dependiendo del petróleo del Medio Oriente como las tendencias actuales lo indican, esto significa una dependencia excesiva de una región de riesgos y alta tensión política. En las tres últimas décadas, el Medio -- Oriente se ha visto sometido a una docena de guerras, revoluciones y disputas territoriales. La dependencia refuerza la vulnerabilidad, la interrupción de los suministros y el mayor incremento de los precios .

3) La Contaminación Térmica

La última forma que adopta la energía cuando la utiliza el hombre es el calor. Las plantas generadoras de electricidad despiden calor, al igual que las máquinas, los aparatos y las lámparas que funcionan mediante electricidad. El calor lo emiten los medios industriales, la calefacción de los edificios y el escape caliente de los motores de automóviles. La producción de calor de -desecho es una consecuencia inevitable del uso de la energía (10).

La mayor parte de la energía calórica que se desperdicia se absorbe en el agua de enfriamiento que utiliza la planta generadora y una vez que el agua de enfriamiento pasa por dicha planta casi siempre se libera hacia el medio ambiente del que se obtuvo. Cuando esta agua tibia influye sobre la vida animal y vegetal que rodea a la planta generadora, se convierte en un medio de contaminación térmica (10).

La contaminación térmica es producto de la alteración del equilibrio térmico de la tierra debido a la transformación de gran

des áreas forestales en campos, por modificación del agua del CO₂ o del ozono contenidos en la atmósfera o por adición de energía - calorífica procedente de una nueva fuente.

La emisión masiva de energía hecha por el hombre no sólo afecta a las condiciones climáticas y al flujo de viento, sino -- que también incrementa la temperatura ambiente (48).

La contaminación térmica se puede convertir en un grave - problema ecológico cuando se produzcan mayores cantidades de calor de desecho en las grandes plantas de generación de energía -- eléctrica, por lo que es importante estudiar a fondo los efectos térmicos en las aguas de enfriamiento cerca de las plantas genera doras. Además, se requieren efectuar más investigaciones para determinar la máxima cantidad de desecho que se puede liberar en un medio acuático específico (10).

4) La Contaminación del Aire

La contaminación del aire es la adición de cualquier sustancia que altere las propiedades físicas y químicas de aquél.

La causa principal de toda la contaminación del aire es - la combustión. Cuando ocurre la combustión perfecta o teórica, el hidrógeno y el carbono del combustible se combinan con el oxígeno del aire para producir calor, luz, dióxido de azufre y vapor de - agua. Sin embargo, las impurezas del combustible, una incorrecta relación entre el combustible y el aire, o temperaturas de combus tión demasiado altas o demasiado bajas son causa de la formación de productos secundarios, tales como monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cenizas finas e hidrocarburos no quemados, todos ellos son contaminantes del aire (46).

A continuación se presenta una clasificación general de los contaminantes del aire:

- a) Materia particulada o partículas
- b) Compuestos que contienen azufre
- c) Compuestos orgánicos
- d) Compuestos que contienen nitrógeno
- e) Monóxido de carbono
- f) Compuestos halogenados
- g) Compuestos radiactivos

La materia particulada se divide frecuentemente en subclases, que incluyen polvo fino (menor de $100\ \mu\text{m}$ de diámetro), polvo grueso (más de $100\ \mu\text{m}$ de diámetro), vapores ($0.001 - 1\ \mu\text{m}$ de diámetro) y neblinas ($0.1 - 10\ \mu\text{m}$ de diámetro). Los vapores son partículas formadas por condensación, sublimación o reacción química, y a veces se las designa como humo (46).

Los puntos b) a f), de la relación anterior se pueden agrupar en dos clasificaciones: contaminantes primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son los emitidos directamente por las fuentes, mientras que los secundarios son los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas entre los contaminantes primarios y las especies químicas que se encuentran usualmente en la atmósfera.

La Tabla No. 2 presenta una lista de los contaminantes primarios y secundarios para las clases de sustancias (46).

C l a s e	Contaminantes Primarios	Contaminantes Secundarios
Compuestos que contienen azufre	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄ ^a
Compuestos orgánicos	Compuestos de C ₁ -C ₅	Cetonas, aldehidos, ácidos
Compuestos que contienen nitrógeno	NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃ ^a
Oxidos de carbono	CO, (CO ₂)	Ninguno
Halógenos	HCl, HF	Ninguno

MSO₄^a y MNO₃^a denotan compuestos de sulfatos y nitratos, respectivamente.

Tabla No. 2. Clasificación General de los Contaminantes Gaseosos del Aire (46).

Algunos de los efectos de los contaminantes del aire en la salud humana, materiales, vegetación y los animales son (46):

a) Las partículas que contienen fluoruros parecen causar - daños en las plantas, y el óxido de magnesio que cae sobre los terrenos agrícolas ha dado como resultado un insatisfactorio crecimiento de la planta.

b) El ganado vacuno y bovino que ha ingerido la vegetación sobre la que se han asentado partículas que contengan arsénico han sido víctimas de envenenamiento.

c) Los óxidos de azufre aceleran la corrosión del metal al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la -

superficie del metal. Dependiendo de la clase de metal expuesto - así como la duración de la exposición, en atmósferas urbanas se - han observado tasas de corrosión de una y media a cinco veces la - tasa obtenida en ambientes rurales.

d) Se sabe por estudios que el monóxido de carbono puede - causar la muerte cuando se encuentra expuesto a una alta concentración (mayor de 750 ppm). La combinación del monóxido de carbono - conduce a la formación de la carboxihemoglobina (COHb); la combinación del oxígeno y la hemoglobina produce la oxihemoglobina -- (O₂Hb).

La hemoglobina tiene una afinidad por el CO que es aproximadamente 210 veces su afinidad por el oxígeno.

Afortunadamente, la formación de COHb en el torrente sanguineo es un proceso reversible, cuando cesa la exposición, el CO que se combinó con la hemoglobina es liberado espontáneamente, y la - sangre queda libre de la mitad de su monóxido de carbono, en pa-- cientes saludables y en un período de 3 a 4 horas. Se mantiene en la sangre un nivel normal de COHb de 0.4%, por el CO producido dentro del cuerpo, independientemente de las fuentes externas (46).

5) La Contaminación del Agua

Hoy se estima que el 40% (unos 5,600 km³) de los flujos es- tables posibles de ser aprovechados por el hombre (corresponden a 14,000 Km³), sufre de contaminación severa producida por los dese- chos generados por las actividades humanas (45).

Esta es una situación crítica para los recursos fluviales - de la tierra, si se toma en cuenta además la desigual distribución de estos recursos en el mundo, el crecimiento de la población mun-

-dial y la intensidad de los procesos de urbanización, las presiones sobre los sistemas agroalimentarios y el incremento de las actividades industriales, sobre todo aquellas ligadas con el procesamiento y el transporte de hidrocarburos y con los aprovechamientos secundarios como la química y la petroquímica (45).

6) La Inversión Térmica

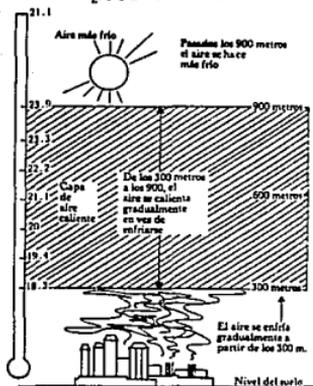
Partiendo del conocimiento de que la circulación en la atmósfera tiene lugar cuando el aire caliente de la superficie de - la tierra se eleva y el aire frío de arriba desciende. Pero si - el aire del suelo es más fresco que el de la capa superior, no subirá, y el aire caliente actuará como la "tapadera de una olla", evitando que los contaminantes suban y sean acarreados por el - viento. Este fenómeno se llama inversión térmica y es el que ocasiona el "smog" (28).

Las inversiones se pueden presentar en cualquier parte y con una frecuencia de 20 a 75% del tiempo (28).

Hasta aquí se han planteado algunos de los problemas causados por la producción y la utilización de la mayoría de las actuales fuentes de energía.

Las posibles soluciones para tratar de aliviar dichos problemas se revisarán en los siguientes capítulos, estos se refieren a los usos y aplicaciones de las fuentes alternas de energía.

**Día claro-Inversión
poco viento**



**Día claro-No hay inversión
algo de viento**

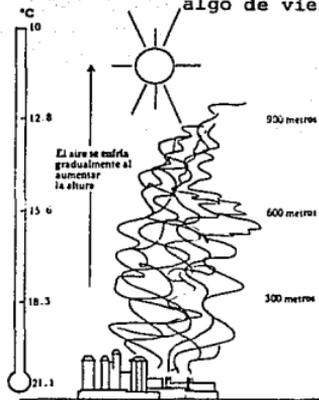


Figura No. 5. Diagrama de Inversión Térmica (28).

C A P I T U L O V

PROCESOS DE TRANSFORMACION DE LA ENERGIA

En épocas pasadas, las habitaciones a veces se "calentaban" empleando alguna clase de fuerza motriz (como la fuerza del agua) para producir la rotación de un plato de hierro sobre otro, la -- fricción entre ambos generaba calor que proveía la calefacción deseada. En este caso se transforma la energía mecánica en calor.

En realidad, éste es ejemplo de una "ley general" que establece que "la energía ni se crea ni se destruye sino que sólo se - transforma", a ésta ley se le conoce como la primera ley de la termodinámica (20), también se denomina ley de la conservación de la energía.

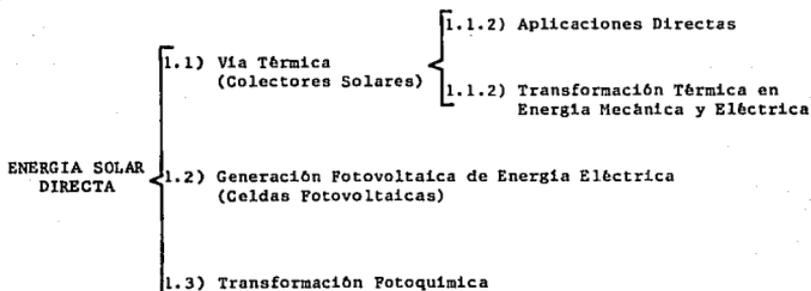
Utilizar la energía significa realmente transformarla, pasarla de una forma a otra, y nuestras máquinas y herramientas pueden considerarse transformadores de energía. En cada una de estas transformaciones se pierde en calor una cierta cantidad de la energía original almacenada en el combustible que se quema, no sólo en la práctica sino también en teoría (20). Teóricamente éste es el significado de la segunda ley de la termodinámica que dice "ningún dispositivo físico real puede transformar por completo la energía calórica en trabajo". Siempre se pierde alguna cantidad de calor (20).

Existe una variedad de equipos y procesos para convertir - las diferentes formas de energía en cualquiera de las demás, para efectos de nuestro estudio, estos procesos se dividieron en dos - grandes grupos;

- 1) Procesos de Transformación de la Energía Solar Directa
- 2) Procesos de Transformación de la Energía Solar Indirecta (Eólica, Biomasa).

1) Procesos de Transformación de la Energía Solar Directa

Las formas de transformación de la energía solar directa son las que se muestran en el cuadro No. 1 (16).



Cuadro No. 1. Procesos de Transformación de la Energía Solar Directa (16).

1.1) Vía Térmica

1.1.1) Aplicaciones Directas

Una de las consecuencias inmediatas de la absorción de la radiación por un cuerpo es el aumento de su temperatura. Esto se puede utilizar directamente para satisfacer las necesidades humanas, como la calefacción de viviendas y hospitales, secado de alimentos o destilación de agua.

El calentador solar de agua, por ejemplo, forma ya parte de la vida cotidiana en países donde el clima lo hace económicamente atractivo, como en Israel y Japón.

Una característica común de los sistemas que aprovechan la energía solar por vía térmica es que emplean o pueden emplear para mejorar la eficiencia de captación; colectores solares.

Un colector solar es un dispositivo que sirve para captar la radiación (energía) solar y convertirla en calor utilizable. Actualmente hay varios tipos de colectores en uso, los dos tipos más comúnmente usados son el colector de placa plana y el colector concentrador (32).

Colectores de Placa Plana

Estos convierten la radiación solar en calor. Aún cuando están limitados a temperaturas de operación inferiores a 100 °C, este tipo de colector presenta múltiples ventajas como por ejemplo: aceptan los componentes de radiación directa y difusa, no requieren movimiento del sol, prácticamente no requieren mantenimiento, pueden constituir una parte integral del techo en algunas edificaciones, etc. (25).

Las partes más importantes de un colector de placa plana se muestran en la figura No. 6. Como puede observarse en la figura citada, la energía solar atraviesa una o varias cubiertas para luego quedar en la placa de absorción. El calor es posteriormente transferido por conducción hacia los tubos, llegando eventualmente por convección hacia el fluido de trabajo (agua, aire). El aislante en la parte inferior y los lados del colector sirve para disminuir las pérdidas de calor de la placa de absorción ha-

cia el ambiente. Todo el conjunto se encuentra dentro de una caja que puede ser metálica, de plástico o de algún otro material (25).

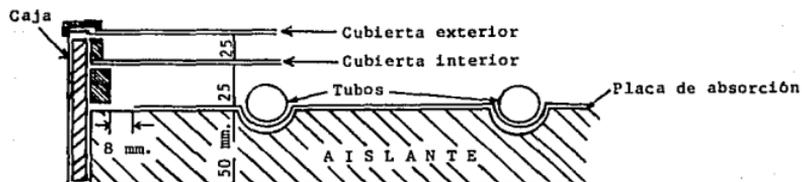


Figura No. 6. Corte Transversal de un Colector Plano con dos cubiertas de vidrio (25).

Los colectores de placa plana se clasifican según el tipo de fluido de transferencia que usa con ellos. Los colectores de tipo líquido utilizan precisamente un líquido como medio de transferencia del calor. El líquido puede ser agua, fluido de silicón u otro. Los colectores del tipo aire emplean aire como medio de transferencia (32).

El funcionamiento de ambos tipos de colectores es similar, sin embargo, el aire tiene menos capacidad térmica que el agua o los otros fluidos de transferencia. Se requieren alrededor de 99.1 m^3 de aire para transportar igual cantidad de calor que 0.028 m^3 de agua. Como resultado, el colector de tipo de -

aire es por lo general mucho más voluminoso que un colector de tipo líquido de igual capacidad (32).

Con respecto a los niveles de temperatura que debe alcanzar el fluido de trabajo en el colector son distintos, por ejemplo en el caso de calentamiento de agua para una piscina se requiere que solo alcance una temperatura de aproximadamente 22 a 29 °C, en el calentamiento de agua para consumo doméstico se requiere que se encuentre de 40 a 60 °C y en aplicaciones de calefacción y enfriamiento de ambientes, el medio de trabajo en los colectores solares debe alcanzar temperaturas del orden de 90 a 100 °C.

Colector Concentrador

La energía solar que incide sobre la superficie de la tierra es de baja intensidad. En consecuencia, para lograr relativamente altas temperaturas en un sistema se hace necesario incrementar la densidad de la energía solar a través de concentradores (25).

En la mayoría de ellos se recurre a una gran superficie reflejante o refractante en donde se capta la energía (el sistema óptico) y de ahí se dirige la radiación hacia el receptor, que incluye al absorbedor. En esta última parte la densidad de la energía es ya del orden de 1.5 ó 2 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Existen muchos tipos de colector concentrador, la mayoría requieren de dispositivos mecánicos para variar la posición y seguir al sol en su recorrido a través del cielo, algunos requieren lentes ópticos especiales para concentrar la energía solar. La

figura No. 7 muestra un colector concentrador lineal. Capta la radiación solar reflejándola, mediante un gran espejo curvo, sobre un receptor que contiene al líquido de transferencia. La mayoría de los colectores concentrador operan únicamente con la componente directa de la radiación solar (32).

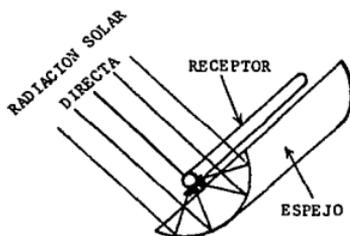


Figura No. 7. Colector Concentrador Lineal (32).

Se han desarrollado muchos tipos de colector concentrador, por ejemplo, el colector lineal de cubeta con lente de Fresnel o el colector compuesto de espejos parabólicos. Todos son capaces de producir temperaturas sumamente elevadas con buena eficiencia y pueden emplearse por ejemplo para calentar el agua destinada a procesos industriales (48).

1.1.2) Transformación Térmica en Energía Mecánica y Eléctrica

Mediante un proceso termodinámico el calor es convertido primero en energía mecánica, por ejemplo, por medio de un motor o una turbina. La energía mecánica es convertida luego en elec-

tricidad empleando un alternador.

Existe una variedad de equipos para convertir energía térmica y luego eléctrica y muchos de ellos pueden adecuarse para - trabajar con energía solar, por ejemplo, el motor de ciclo de vapor (ciclo Rankine), el generador termoeléctrico, el convertidor magnetohidrodinámico (MHD) y el convertidor termoiónico (48).

Ciclo Rankine

Un líquido se bombea bajo presión a una caldera, donde se calienta y se convierte en vapor; éste se expande en una turbina o en un motor de pistón para producir energía mecánica; el vapor que sale del expansor a baja presión se condensa al ser enfriado y se bombea como líquido a la caldera, con lo que el ciclo se reanuda.

El ciclo Rankine presenta las siguientes características: está sujeto al rendimiento de Carnot; emplea como combustible carbón, petróleo y gas; la temperatura máxima alcanzada es de 550°C ; el rendimiento es de 40%; el tamaño de 1000 megawatts; presenta - una durabilidad de 40 años; la disponibilidad es de 95% del tiempo de servicio y el tiempo empleado en la construcción es de 3 a 5 años (48).

Generador Termoeléctrico

Es factible convertir directamente la energía solar en - electricidad por medio de pares termoeléctricos, sin maquinaria y sin partes móviles. Un par termoeléctrico se construye yuxtaponiendo trozos de conductores o de semiconductores de distintos tipos y calentando una unión y enfriando la otra. La obtención de potencial y generación de energía eléctrica por este método fué -

descubierta por Seebeck en 1821.

Durante mucho tiempo se han utilizado los pares termoeléctricos para medir temperaturas y para construir termostatos. Generalmente los pares son de cobre y de una aleación de cobre y níquel llamada constantan, o de aleaciones de cromo y aluminio llamadas alumocromos. Estos pares metálicos proporcionan voltajes de 42 a 62 microvolts $^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente. También se pueden fabricar pares termoeléctricos de compuestos de elementos de los grupos 4, 5 y 6 de la tabla periódica o también de sustancias con valencias mixtas, las cuales producen voltajes comparativamente pequeños, pero son capaces de funcionar a temperaturas elevadas, de hasta 800°C (9).

Un par termoeléctrico debe cumplir tres condiciones para ser eficaz en la conversión de energía solar en electricidad: gran voltaje por grado, gran conductividad eléctrica para evitar pérdidas debido al calentamiento interno, y conductividad térmica baja para impedir transmisión de calor de la unión caliente a la fría (9).

Convertidor Magnetohidrodinámico (MHD)

El MHD es un generador de electricidad mediante la acción de un campo magnético superconductor en un plasma fuertemente ionizado. El plasma se crea por la combustión de un combustible fósil a alta temperatura.

Lo importante del MHD es que la energía térmica de un gas o líquido se convierte directamente en energía eléctrica sin necesidad de turbina y generador rotativo. Al no existir partes móviles, el sistema se simplifica, permitiendo el empleo de altas tem

peraturas con lo que los rendimientos de las plantas de generación de electricidad pueden ser más altos.

Convertidores Termoiónicos

En los convertidores termoiónicos se calienta una superficie capaz de emitir electrones a una temperatura muy alta, de 1500 °C ó superior, y los electrones se "evaporan" en el vacío o en una atmósfera de iones positivos, como los iones cesio. Los iones que se separan del metal por efecto del calor se denominan termoiones.

Se coloca una lámina receptora del metal frío con una separación de algunas centésimas de milímetro, recoge los electrones que recorren la pequeña separación y son conducidos a través de un conductor externo al electrodo que los emite.

Existen convertidores termoiónicos que funcionan a 1700 °C de temperatura con un rendimiento de 19% (9).

1.2) Generación Fotovoltaica de Energía Eléctrica

Las Celdas Solares Fotovoltaicas

Son dispositivos que convierten la luz del sol directamente en electricidad por medio del llamado "efecto fotovoltaico".

El efecto fotovoltaico se define como la aparición de una diferencia de potencial (voltaje) entre las terminales de un material cuando este es iluminado, este efecto fué observado por primera vez en 1897 por Becquerel y explicado en los inicios de la década de los 50's por los científicos de los Laboratorios Bell Telephone, mismos que desarrollaron el primer transistor.

A finales de la década de los 50's las celdas solares fueron utilizadas como fuente de electricidad en los satélites espa-

ciales, donde su tecnología se perfeccionó. Durante la década de los 70's se industrializaron para aplicaciones terrestres, como alternativa a las fuentes de energía convencional (34).

Operación

El material utilizado para fabricarlas son obleas de silicio, con las mismas características que las usadas en los diodos, transistores y microcircuitos electrónicos. Para que sean útiles deben ser de altísima pureza y con un orden atómico perfecto -- (cristal).

La estructura de una celda solar es similar a un diodo -rectificador común. Consiste en una oblea a la que se han añadido cantidades controladas y minúsculas de boro (cara inferior) y fósforo (cara expuesta al sol). Ello hace que en la interfaz de ambas regiones se forme un campo eléctrico interno. Esta estructura se denomina unión P-N (positiva-boro, negativa-fósforo), como se muestra en la figura No. 8.

Cuando la luz incide en el silicio, su energía es transferida a los electrones de silicio, lo cual los pone en movimiento. Si estos electrones "libres" llegan a la región del campo eléctrico, son "barridos" por éste de un lado a otro de la unión P-N. Si hay un circuito externo que conecte la cara superior y la inferior, se establece una circulación ordenada de cargas eléctricas, esto es una corriente eléctrica.

La corriente eléctrica es proporcional al área expuesta a la luz y a la intensidad de la misma. El voltaje depende de las características del campo eléctrico interno y por lo tanto del material mismo.

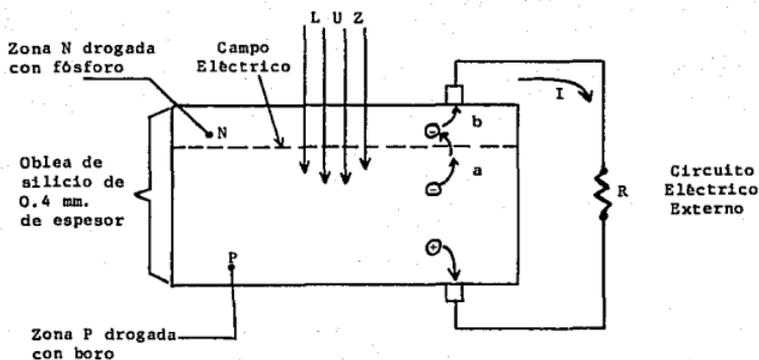


Figura No. 8. Operación de una Celda Fotovoltaica (34).

Características Eléctricas

Para entender las características eléctricas habrá que conocer las de un diodo y luego añadirle el efecto de la iluminación.

La curva intensidad-voltaje (I - V) del diodo representa gráficamente su comportamiento, nos dice cual es la corriente para un valor dado de voltaje.

La corriente fluye adecuadamente cuando se aplican voltajes positivos y no conduce corriente prácticamente si los voltajes son negativos.

La curva I - V de la celda solar es similar pero desplazada por la corriente generada por la iluminación.

La curva I-V nos da la cantidad de corriente (a cierta -- iluminación) que se obtendrá a un voltaje dado, como lo muestra -- la figura No. 9

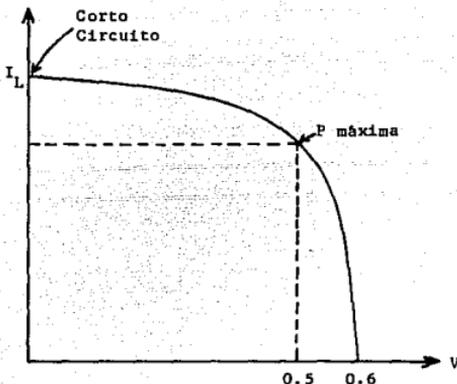


Figura No. 9. Curva de Corriente-Voltaje de una Celda Solar (34).

A cero voltaje (corto circuito) la corriente que se obtiene es la máxima posible y se denomina corriente de corto circuito o de iluminación.

Una celda solar puede entregar desde cero hasta 0.6 volts dependiendo de la carga que se le conecte. Existe un voltaje para el cual la potencia es máxima, se denomina "punto de máxima potencia" y es recomendable operar la celda a este voltaje para extraer el máximo de potencia de ella, aún cuando puede utilizarse a otros voltajes.

Para una insolación menor la corriente disminuye proporcionalmente pero el voltaje disminuye muy lentamente, como lo muestra la figura No. 10.

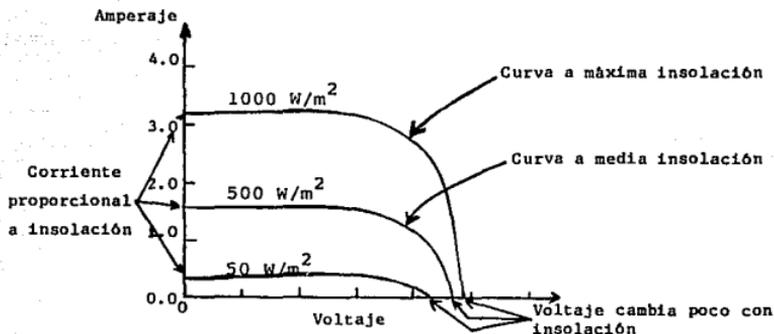


Figura No. 10. Curva de Corriente-Voltaje para diferente Insolación (34).

Efecto de la Temperatura

Cuando la celda está bajo el sol se calienta a temperaturas arriba de la temperatura del medio ambiente ya que es un cuerpo oscuro. Para un día soleado la temperatura de la celda es de 25-30 °C arriba de la temperatura del aire.

Al calentarse, la corriente de la celda se incrementa pero casi imperceptiblemente: 0.003 mA/m² por cada grado centígrado. El voltaje disminuye con el incremento de la temperatura - aproximadamente 0.002 volts por cada grado centígrado.

Características Relevantes

El proceso de generación ocurre en un sólido, por lo que no se degrada y en principio es eterno. Tampoco requiere de mantenimiento y no usa otro combustible para generar que la luz del sol. Es un generador liviano y de pequeñas dimensiones para -- transportar.

Los Módulos Solares Fotovoltaicos

Un módulo solar es un grupo de celdas interconectadas en un mismo montaje que las protege del medio ambiente y que permite maniobrarlos. Incluye las terminales eléctricas de salida de corriente. Está construido por laminado de vidrio templado, al - cual se adhieren térmicamente hojas de plástico entre las cuales se haya el circuito de celdas. Generalmente en la periferia del laminado se coloca un marco metálico, resistente a la intemperie. Lo mismo se puede decir de las terminales eléctricas.

Las celdas de un módulo están conectadas en serie para incrementar su voltaje de manera que se tenga un valor útil. Casi siempre se selecciona el de baterías de 12 volts nominales a las cuales es común conectar los módulos.

El voltaje de una batería de 12 volts que se está cargando realmente es de 13.5 a 14 volts, por lo que el número de celdas en serie para dicho voltaje son:

$$\text{No. celdas} = \frac{13.8 \text{ volts.}}{0.44 \text{ volts}} = 31$$

voltaje de celda a temperatura de operación

Usualmente se añaden dos celdas más para compensar las -- caídas de voltaje en el cableado y en los dispositivos de paso de control de carga (diodos de bloqueo).

La curva I-V de un módulo es similar a la de una celda - con la misma corriente, con el voltaje aumentado tantas veces como número de celdas haya. Ver la figura No. (11).

Aún cuando el voltaje óptimo es 14.0 volts, el módulo pue de entregar hasta 16-18 volts. Para que en este diseño de módulo se evite que la batería se sobrecargue hasta esos voltajes, es ne cesario interrumpir la conexión con el módulo cuando ya se alcanzó el voltaje adecuado.

Características Relevantes

La construcción del módulo asegura una vida típica del - orden de 20 años. Los materiales utilizados son: vidrio, alumi-- nio o acero inoxidable, plásticos termocomprensibles o silicenes.

Los factores ambientales que deben resistir son: agua, hu medad, altas y bajas temperaturas, salinidad, granizo y otros im-- pactos, carga de viento, rayos ultravioleta del sol, dilataciones térmicas, etc.

Se puede conectar módulos en paralelo para aumentar su co rriente o en serie para aumentar su voltaje

El conjunto de módulos se denomina arreglo fotovoltaico.

Un módulo se especifica diciendo su voltaje de operación y corriente a máxima insolación y la temperatura a la que se dan estos valores.

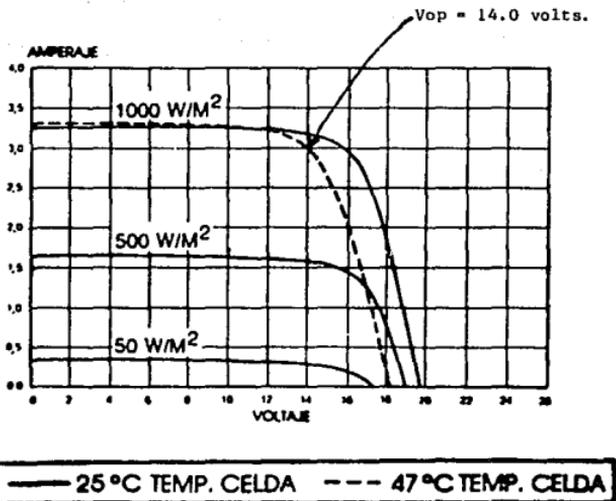


Figura No. 11. Características de Operación de un Módulo Solar (34).

Ejemplo: Módulo con 33 celdas cuadradas de 10 x 10 cm.

$I_{op} = 2.9$ Amper (29 mA/cm²)

$V_{op} = 16.5$ volts (0.5 x 33)

$T = 25^{\circ}C$

$I_{ns} =$ Pico (1000 Watts/m²)

Baterías

Las baterías electroquímicas son dispositivos que almacenan (no generan) electricidad en forma de energía química como resultado de las reacciones que tienen lugar en su interior. Las baterías o pilas primarias no pueden ser recargadas, es decir, sólo son útiles un ciclo de descarga. Las baterías secundarias o acumuladores pueden ser descargadas y recargadas debido a que la reacción química que se lleva a cabo es reversible.

En sistemas fotovoltaicos se usan acumuladores que se cargan con los módulos solares para que su energía sea usada posteriormente durante la noche o época de días nublados (34).

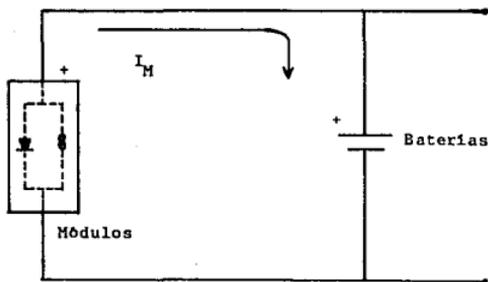


Figura No. 12. Circuito de Carga de una Batería (34).

Los tipos más usuales de acumuladores son: plomo-ácido y níquel-cadmio. En sistemas fotovoltaicos los más frecuentemente usados son plomo-ácido.

Los componentes de un acumulador plomo-ácido son los siguientes:

Reja o placa metálica de plomo que colecta la corriente y sostiene al material activo.

PbO_2 (óxido de plomo) material activo positivo.

Pb (plomo) esponjoso, material activo negativo.

Electrolito, medio para que ocurra la reacción, compuesto por ácido sulfúrico diluido en agua.

Separadores, evitan que las placas negativas entren en contacto con las positivas.

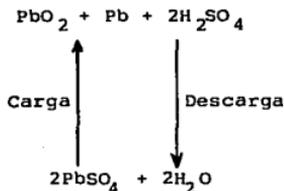
Contenedor, caja de hule o plástico resistente al ácido, debe soportar colgante el peso de las placas.

Conectores, fijan las terminales eléctricas al exterior.

Cuando la batería esta en circuito cerrado produciendo corriente el PbO_2 de un grupo de rejillas y el Pb del otro grupo, se combinan con los iones H^+ y SO_4^{2-} disociados del electrolito formando sulfato de plomo ($PbSO_4$) y agua (H_2O). Cuando toda la superficie de las placas queda recubierta con sulfato de plomo, ya no se obtiene más corriente de las placas.

Para recargar un acumulador se conectan las dos terminales a una fuente de corriente continua (el generador solar en este caso). Al fluir la corriente por el electrolito se invierten los procesos químicos, retrocediendo todo a su composición original.

Químicamente se puede escribir de la siguiente forma:



La densidad del electrolito es alta cuando la batería está cargada (más ácido sulfúrico).

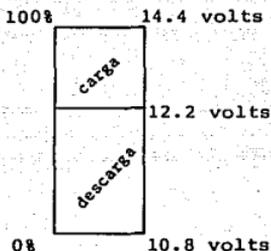
El voltaje interno de la batería es 2.04 volts por cada celda. En un acumulador de 12 volts, se ponen en serie 6 celdas. Cuando la batería se descarga, este voltaje disminuye por la caída de voltaje en la resistencia interna de la celda.

12.2 volts \longrightarrow 10.8 volts
descarga

Cuando la batería se carga, este voltaje aumenta ya que la caída del voltaje es en la misma dirección de la celda.

12.2 volts \longrightarrow 14.4 volts
carga

El rango de voltajes que dá un acumulador de 12 volts es:



Construcción

La capacidad de una celda depende del número de placas, - de su área y de su espesor.

Por lo general, las placas de un acumulador no son de plomo puro, pues éste se deforma fácilmente y su costo es alto. El plomo se combina en aleaciones con otros metales, además las placas se fabrican delgadas o gruesas según convenga (34).

1.3) Transformación Fotoquímica

El hecho de que con la luz se decoloran los pigmentos se sabe y utiliza desde hace siglos y ya en el siglo XVIII, se descubrió el ennegrecimiento de ciertas sales de plata al exponerlas a la luz. En 1839 se descubrió otro efecto al observar Becquerel - que la diferencia de potencial en una pila química, con la que estaba experimentando variaba al incidir la luz sobre uno de sus - electrodos. A partir de estos comienzos, ha nacido un campo de - la ciencia a la que se le conoce como Fotoquímica (4).

La Fotoquímica trata del estudio del efecto de la energía

radiante en las reacciones químicas y de las velocidades y mecanismos de las reacciones iniciadas por la acción de la luz.

Se tiene que una reacción fotoquímica puede producir un combustible químico utilizable o puede usarse en una celda foto--galvánica o fotoelectroquímica para producir energía eléctrica.

Cuando se pasa un rayo de luz solar a través de un recipiente que tiene muchas moléculas, parte de la luz lo atraviesa - sin sufrir ningún cambio, pero la luz de ciertas longitudes de onda se puede absorber, coloreando la sustancia absorbente. La luz está compuesta de un gran número de unidades llamadas fotones, - cada una de ellas con una energía definida llamada cuantos de -- energía. Sólo si la molécula puede modificarse de manera que absorba una cantidad de energía aproximadamente igual a la contenida en un fotón dado, el fotón tendrá posibilidades de ser absorbido por la molécula. La absorción de energía de la luz visible y ultravioleta se realiza con el desplazamiento de un electrón desde su posición normal dentro de la molécula. En el infrarrojo, - la absorción se realiza por desplazamiento de los átomos dentro - de la molécula por rotación de la misma. Para producir reaccio--nes químicas ordinarias es necesario que se produzcan desplaza---mientos de electrones a fin de obtener suficiente energía de activación. Para la luz solar las longitudes de onda capaces de producir la varían 8000 angstroms (^oA) en el rojo y 3000 angstroms en el ultravioleta que corresponden aproximadamente a 36000 cal/mol y 95000 cal/mol (9).

Por otra parte la diferencia básica entre un sistema foto electroquímico y uno fotoquímico es la presencia de un flujo de -

carga eléctrica a través de un conductor externo que une las zonas anódica y catódica, separadas físicamente.

Si en el diseño de una celda electroquímica convencional se sustituye uno o los dos electrodos metálicos por electrodos se miconductores, se pueden obtener celdas fotoelectroquímicas, ya sea de tipo galvánico o de tipo electrolítico.

Una celda fotoelectroquímica de tipo galvánico es aquella diseñada para transformar directamente la energía luminosa en -- energía eléctrica y las de tipo electrolítico tienen como objetivo principal utilizar la energía solar para promover reacciones químicas.

La energía queda entonces contenida como energía química en las sustancias producidas. Si la energía proporcionada al sis tema es de origen solar se tiene que:

Sustancias de bajo contenido energético (reactivos) + energía solar = sustancias de alto contenido energético

Así, la ventaja de un sistema de este tipo es que no sólo se logra la transformación de la energía solar sino que también queda almacenada en los productos obtenidos, por ejemplo, la descomposición del agua para obtener combustibles, como el hidrógeno.

2) Procesos de Transformación de Energía Solar Indirecta.

Se les llama fuentes de energía solar indirecta a las que resultan de las diferencias de temperatura que suceden en la tierra o por medio de la fotosíntesis y son la energía del viento o eólica y la de la biomasa.

2.1) Transformación de la Energía del Viento o Eólica

La energía cinética del viento puede transformarse en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto directo con el viento y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta cuando interviene un elemento intermedio para su transformación (1). La energía mecánica rotacional puede a su vez ser transformada en energía eléctrica o térmica, tal como lo muestra el siguiente esquema.

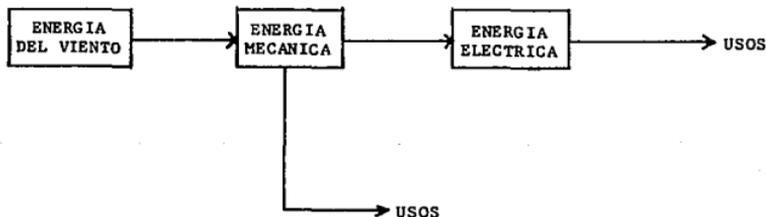


Figura No. 13. Proceso de Transformación de la Energía del Viento (**).

El sistema conversor de energía eólica en energía eléctrica es llamado aerogenerador y está integrado por rotor, caja de transmisión, generador, torre y control (39).

(**) Ing. Misael Pavón Díaz. Energía Solar y Eólica. Universidad de Carabobo, Valencia.

De acuerdo con la orientación del eje del rotor puede ser - clasificado como de eje horizontal o de eje vertical (39) , y con respecto a la capacidad de producción de energía eléctrica están - clasificados como pequeños (se obtienen hasta 50 kilowatts y tienen un diámetro del rotor hasta de 15 metros), medianos (se obtienen de 50 a 500 kilowatts con un diámetro de rotor entre 15 y 35 - metros) y por último grandes (de los que se puede obtener de 500 - kilowatts hasta varios megawatts con un diámetro de rotor de entre 35 y 100 metros).

La energía anual obtenida es función del diámetro del rotor y de las velocidades del viento del lugar de instalación.

Los componentes básicos de un sistema de transformación -- viento-electricidad se indican en el siguiente esquema:

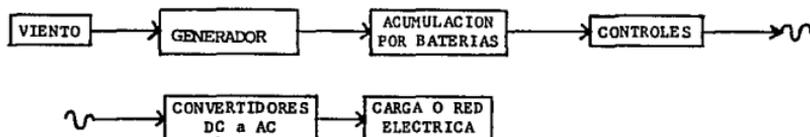


Figura No. 14. Elementos para la Transformación Viento-Electricidad(**).

La segunda ruta de importancia, es la transformación de la energía del viento en mecánica y ésta se efectúa por sistemas llamados aeroturbinas (1) , los cuales usan una transmisión mecánica - que transforma el movimiento rotativo del rotor en un movimiento - alternativo que acciona directamente una bomba (39).

(**) Ing. Misael Pavón Díaz. Energía Solar y Eólica. Universidad de Carabobo, Valencia.

La eficiencia de transformación de la energía del viento en mecánica es máxima sólo para un valor de la razón de velocidad tangencial, misma que tiene un intervalo característico que depende de la solidez de la aeroturbina de que se trate (1), así tenemos que, las eficiencias de transformación que se han obtenido con aeroturbinas de eje horizontal van desde un 30% hasta el 45%. Estas últimas se han obtenido con aeroturbinas de dos aspas; a medida que aumenta la solidez de la aeroturbina (aumenta el número de aspas) la eficiencia disminuye.

En el caso de aeroturbinas de eje vertical tipo Darrieus se han alcanzado eficiencias del 35% y en las de tipo Savonius, que presenta el comportamiento mas pobre, se alcanzan eficiencias máximas de 15% (1).

Otro criterio importante para evaluar las aeroturbinas es el costo por unidad de potencia instalada o por unidad de energía útil obtenida (7).

A continuación se muestra un esquema con los elementos básicos para la transformación de la energía del viento a mecánica:

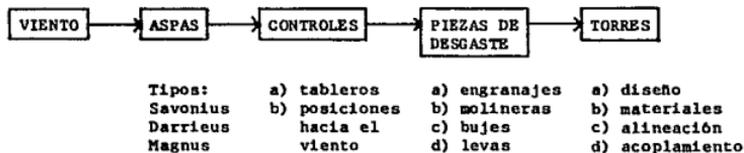
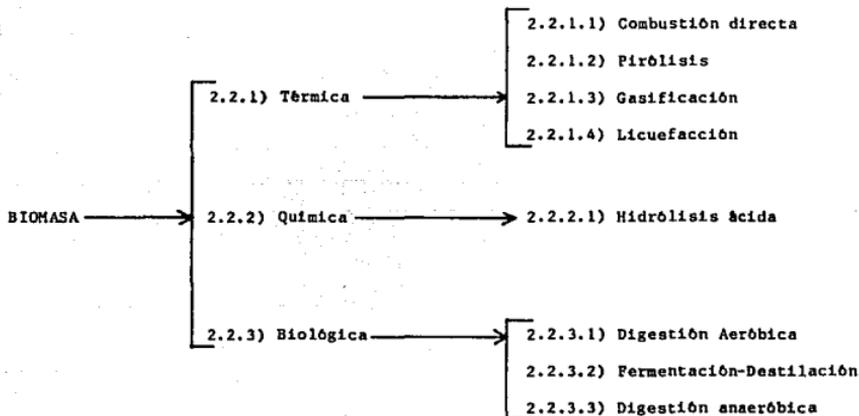


Figura No. 15. Elementos para la Transformación de la Energía del Viento a Mecánica (**).

(**) Ing. Misael Pavón Díaz. Energía Solar y Eólica. Universidad de Carabobo, Valencia.

2.2) Transformación de la Energía de Biomasa

Se conocen tres rutas básicas de conversión de la biomasa, las cuales se muestran en el siguiente cuadro:



Cuadro No.2. Procesos de Transformación de la Energía Biomásica (1).

2.2.1) Transformación Térmica

Estos procesos consisten en la aplicación de cierta cantidad de calor para inducir condiciones térmicas específicas que - provoquen reacciones químicas en la biomasa, obteniéndose como resultado más calor, como es el caso de la combustión o formándose productos combustibles como carbones, gasolinas y gases.

2.2.1.1) Combustión Directa

En la actualidad es la forma más simple de recuperar la energía de la biomasa, aunque la eficiencia térmica puede ser muy baja, la mayoría de la población rural mundial la emplea para calentamiento y cocción de alimentos y en algunas instalaciones industriales para generar calor y vapor.

Los sistemas de combustión directa cuyos principios de operación son bien conocidos incluyen fogatas abiertas, cocinas simples. En las estufas y unidades de combustión directa bien diseñadas es posible lograr una eficiencia de hasta 60-80%, mientras que en la combustión a cielo abierto ésta se reduce al 5 ó 10% (3, 47).

2.2.1.2) Pirólisis

Este proceso que consiste en el rompimiento de las moléculas (biomasa) para producir materiales combustibles en forma de sólidos, líquidos o gases, el rompimiento se logra en un medio ausente de aire a una temperatura que varía entre 100 - 200 °C, produciéndose por cada kilogramo de biomasa lo siguiente: mezcla de gas 0.50 m³ con poder calorífico que varía de entre 4000 a 7000 Kcal/kg., carbón vegetal 0.75 kg. con poder calorífico de 3800 a 6670 Kcal/kg., hidrocarburo 0.26 lts. con poder calorífico de 8000 Kcal/lt.

2.2.1.3) Gasificación

Es un proceso termoquímico en el que la biomasa se convierte en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno como principales combustibles (1, 23).

La gasificación se basa en la oxidación incompleta de la biomasa empleada como materia prima, produciendo gases de bajo a alto contenido calorífico (hasta $37000 \text{ KiloJoule/m}^3$) según se utilice aire u oxígeno puro y de acuerdo a las temperaturas y presiones de la reacción. Generalmente, el gas producido tiene que purificarse antes de ser almacenado, transportado o empleado (1).

Según el principio de operación del reactor pueden distinguirse cuatro tipos de gasificadores: el colector fijo, el colector fluidizado, el colector en tren y el baño fundido. Estos -- usan diferentes agentes de gasificación, tales como aire, oxígeno o vapor y producen una diversidad de gases de valor térmico bajo a medio (47).

Los sistemas actuales están limitados a una producción máxima de 200 Kilowatts. Pueden usar biomasa, siempre que ésta tenga un contenido de humedad de menos del 25% y un contenido de ceniza de menos del 6%, entre estos se encuentran trozos y bloques de madera, aserrín granulado, mazorcas de maíz, cáscaras de coco y diferentes tipos de semillas de frutas.

2.2.1.4) Licuefacción

Es un proceso en que los materiales con alto contenido de carbón pierden oxígeno a través de una reacción con monóxido de carbono. La licuefacción puede efectuarse por tres vías generales (1,3).

a) Empleando un catalizador alcalino y un agente reductor bajo condiciones de altas temperaturas y presiones para convertir la biomasa en combustibles líquidos.

b) Convirtiendo la biomasa en gases de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono u olefinas) a través de un paso preliminar de gasificación empleando los gases de síntesis para elaborar combustibles líquidos, tales como metanol, etanol o gasolina.

c) Usando técnicas de pirólisis y ajustando las variables de operación para producir la máxima cantidad de aceite pirolítico.

2.2.2) Transformación Química

Dentro de este tipo de conversión, el proceso más conocido es el de la hidrólisis ácida, el cual se efectúa sobre desperdicios de madera, los cuales son calentados en un medio ácido, con lo que se logra la ruptura de los enlaces entre las moléculas de la glucosa, posteriormente se efectúa una fermentación de las moléculas produciendo alcohol etílico.

2.2.3) Transformación Biológica

Estos procesos son también conocidos como bioconversión, pues son reacciones químicas causadas mediante el tratamiento de la biomasa, por enzimas, hongos o microorganismos, una de las ventajas de los procesos biológicos, es que no requieren usar condiciones extremas de presión y temperatura en el proceso.

Se conocen tres tipos de conversión biológica: digestión aeróbica, fermentación-destilación y digestión anaeróbica, los cuales se describen a continuación:

2.2.3.1) Digestión Aeróbica

Este proceso consiste en la descomposición de materia orgánica en presencia de oxígeno.

Básicamente, este tipo de digestión ocurre en la atmósfe-

ra, alcanza temperaturas altas de más de 70 °C y desprende bióxido de carbono y otros gases. Por ello, puede considerársele una combustión pues usa oxígeno del aire para combinarse con virtuales - "combustibles" que aporta la materia orgánica en esta descomposición (12).

El empleo de este proceso se ha generalizado en el tratamiento de aguas negras, efluentes industriales y elaboración de fertilizantes orgánicos.

2.2.3.2) Fermentación-Destilación

Aquí se convierte la glucosa en etanol, bióxido de carbono y un subproducto no fermentable (vinaza).

Las soluciones de azúcar se fermentan fácilmente en etanol, con suficiencias energéticas de 85-90%. Después de completar la fermentación, la masa se destila para obtener alcohol -- (de 96° Gay-Lussac), como producto final (47).

El etanol se puede obtener de cualquier tipo de materia orgánica que contenga azúcares como betabel, trigo, maíz, papa y caña de azúcar (5).

En el caso de la caña de azúcar, se puede obtener hasta 60 litros de etanol por tonelada de materia y en un momento dado el etanol puede sustituir parcialmente a la gasolina (29).

La principal desventaja del etanol es su inferior valor térmico comparado con el de la gasolina (22 MegaJoule/Kg. comparado con 32 MegaJoule/kg.), esta desventaja se ve equilibrada por una inferior eficiencia térmica (hasta 30% comparado con 22%) (47).

2.2.3.3) Digestión Anaeróbica

Este proceso de fermentación se lleva a cabo por un grupo de bacterias anaeróbicas llamadas en conjunto metanogénicas que al actuar sobre la biomasa, producen una mezcla de gases que han recibido el nombre de biogas, estos microorganismos son anaerobios, es decir, sólo pueden vivir en un medio exento de oxígeno y por lo tanto de aire.

En la biodegradación anaerobia de la materia orgánica intervienen cuatro grupos de organismos: hidrolíticos, fermentativos, degradadores de ácidos grasos y metanogénicos, éstos últimos son los únicos productores de metano conocidos.

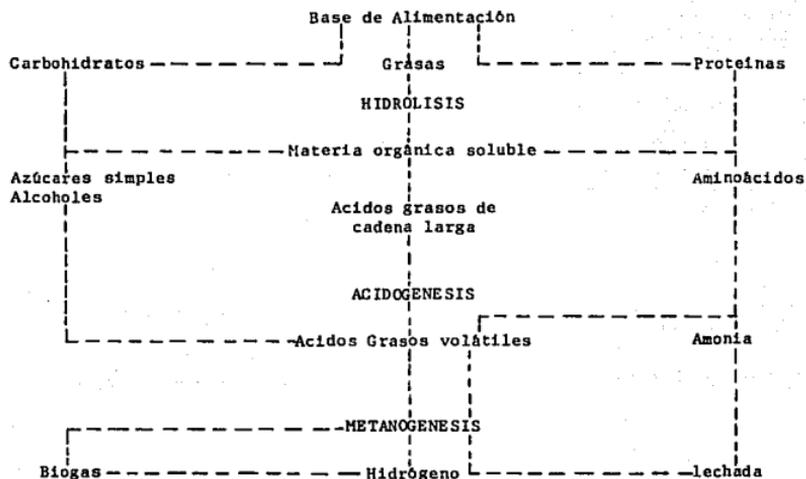
Los metanógenos son anaerobios muy estrictos, mesófilos o termófilos, de morfología muy variable de típica composición de la pared, con componentes lipídicos y coenzimas no encontradas en otros organismos y mecanismos especiales de síntesis de materia orgánica (3).

La metanogénesis es un proceso presente en la mayoría de los habitats anaerobios: digestores de lodos y residuos orgánicos, sedimentos y fangos acuáticos, terrenos pantanosos, etc., y es de origen exclusivamente microbiano ya que los únicos organismos capaces de producirlos son unas bacterias que tienen un tipo-específico de metabolismo energético.

Sin entrar en la descripción de análisis de las reacciones conviene añadir que los metanógenos forman metano litotróficamente, oxidando el hidrógeno y reduciendo el dióxido de carbono (3).

El Proceso Anaeróbico

Este proceso se lleva a cabo en tres etapas según lo muestra el diagrama del cuadro No. 3, y son: la etapa de solubilidad o hidrólisis, etapa acidogénica y etapa metanogénica (17).



Cuadro No. 3. El Proceso Anaeróbico (7).

Las bacterias "anaeróbicas" responsables de la digestión no pueden sobrevivir con la menor traza de oxígeno en la mezcla de estiércol que se alimenta al digestor, por ello después de la carga pasa un largo período antes de que se produzca la digestión.

Durante ese período aeróbico inicial, las bacterias que requieren del oxígeno utilizan las trazas de oxígeno y liberan

así grandes cantidades de dióxido de carbono. Cuando desaparece el oxígeno se puede iniciar el proceso de la digestión, el cual implica las siguientes etapas (3, 17).

1) Solubilidad o Hidrólisis

Las proteínas complejas, como carbohidratos, celulosa, - grasas y aceites, son disueltos enzimáticamente, la hidrólisis - transforma los complejos orgánicos en aminoácidos y azúcares simples, ácidos grasos y glicerol, estos compuestos simples la mayoría solubles, ya pueden pasar a través de las paredes celulares - de las bacterias acidogénicas que son las que se encargan de llevar a cabo la siguiente etapa,

2) Acidogénesis

Los compuestos hidrolizados se convierten por un grupo de bacterias "formadoras de ácido" en compuestos simples, tales como ácidos grasos volátiles, amoníaco, dióxido de carbono e hidrógeno.

3) Metanogénesis

Los compuestos simples del paso anterior son convertidos en metano y dióxido de carbono por un grupo de bacterias estrictamente anaeróbicas. Un número muy limitado de compuestos, dióxido de carbono, hidrógeno, ácido acético y metanol pueden usarse directamente por las bacterias del metano. Siendo el ácido acético el compuesto que aporta alrededor del 70% del metano en el biogas.



Factores que Gobiernan el Proceso

a) Propiedades de la Base de Alimentación del Digestor

Cualquier material que contenga sustancias alimenticias, tales como grasas, carbohidratos o proteínas pueden ser digeridos en una planta de biogas. Por lo tanto, la eficiencia de digestión de la materia prima depende de sus propiedades físicas y químicas (17).

Existen diversas mediciones que se pueden hacer para definir las propiedades de la materia prima (base de alimentación) o de la lechada (desechos y agua) como por ejemplo las siguientes:

a.1) Sólidos Totales (%)

El peso de materia seca que queda después del secado (por calentamiento a 105 °C). El total de sólidos incluye componentes digeribles o "sólidos volátiles" y residuos no digeribles o "sólidos fijos" (38).

El porcentaje de sólidos totales dependerá del tipo de desecho que se maneje y por lo tanto se debe establecer el grado óptimo de dilución para cada tipo de desecho. Los valores óptimos que una carga de desecho debe contener entre 8 y 12% de sólidos totales. De cualquier modo, los desechos "materia prima" pueden ser diluidos con agua para obtener el porcentaje de sólidos totales deseados para ser usados en la planta de biogas (17).

a.2) Sólidos volátiles

Es una medida de los sólidos orgánicos perdidos cuando la materia seca es quemada (a 500 °C ó 600 °C). Se puede considerar como la cantidad de sólidos que transforman realmente las bacterias.

En la Tabla No. 3 se presentan las propiedades de desechos de animales típicos (17,33).

TIPO DE ANIMAL	ESTIERCOL FRESCO PRODUCIDO AL DIA (KG/DIA)	LITROS DE BIOGAS PRODUCIDO POR CADA KG. FRESCO	SOLIDOS TOTALES (%)
Vaca	10.00	60	20
Cerdo (50 Kg)	2.25	78	18
Gallina (2 Kg)	0.18	62	44
Heces humanas	0.40	70	17

Tabla No. 3. Propiedades de Desechos de Animales Típicos (17).

b) Relación Carbono/Nitrógeno en la Materia Prima

b.1) Carbono

El carbono existe en muchas formas no directamente utilizables para las bacterias. La forma de carbono no digerible más común es la lignina, un compuesto vegetal complejo que hace que las plantas terrestres sean rígidas y resistentes a la descomposición. La lignina puede entrar a un digestor ya sea directamente con los desechos de plantas, o bien, indirectamente como material

de residuos vegetales no digeridos en el estiércol.

b.2) Nitrógeno

El contenido de nitrógeno de un determinado material de desecho varía dependiendo de las condiciones de crecimiento, edad del animal, la dieta, cantidad de orina que se recoge junto al estiércol, pues la orina es una forma de liberarse del exceso de nitrógeno.

La digestión anaeróbica se lleva a cabo mejor cuando las materias primas suministradas a las bacterias contienen ciertas -cantidades de carbono y nitrógeno, al mismo tiempo. La razón de carbono a nitrógeno (C/N) representa la producción de los dos elementos.

Cuando un material contiene 20 veces más carbono que nitrógeno tendrá una razón C/N de 20 a 1 (33).

La composición del desecho que se utilice en el digestor es el primer factor que se toma en cuenta y la relación ideal que se emplea es de: C/N = 25/1 (17).

En la Tabla No. 4, se muestran las relaciones C/N de diversos desechos.

c) Temperatura

La descomposición anaeróbica puede llevarse a cabo en un intervalo de temperaturas que van desde 15 hasta 60 °C. Las bacterias cuyo ciclo biológico se lleva a cabo entre 15 y 35 °C son llamadadas mesofílicas, proliferando en forma óptima a 35 °C, y aquellas que cumplen su ciclo en temperaturas que van de 35 hasta --60 °C son llamadas termofílicas, encontrándose su temperatura óptima en 55 °C (12).

Para sistemas de construcción y operación sencilla, es -- más conveniente trabajar con bacterias mesofílicas y es preciso - hacer hincapié en que son sumamente sensibles a cambios bruscos - de temperatura, deberá procurarse una temperatura de operación de 30 a 35 °C para lograr una buena eficiencia del proceso, ya que la producción total de gas aumenta al acercarse a la temperatura óptima, además de que la velocidad de producción de biogas aumenta considerablemente (12).

MATERIAL	% N	% C	C/N
Estiércol de ganado vacuno	3 - 4	25 - 40	20 - 30
Estiércol de caballo	2	58	25
Desecho de oveja	3.8	75	20
Desecho de cerdo	3.4	53	14
Estiércol de aves de corral	3.7	30 - 35	8
Heces humanas	4 - 6	40	6 - 10
Orina humana	15 - 18	13	0.8
Aguas negras	1 - 9	24 - 35	15 - 23
Residuos de arroz	0.6	40	47.2

Tabla No. 4. Relaciones C/N de Diversos Desechos (17).

d) Efecto del pH

En digestores que operan con estiércol de bovino, se han obtenido niveles de pH en el intervalo de 6.7 a 7.5. El pH se mantiene en este rango si el digestor está operando correctamente. Si se pierde el equilibrio en un digestor y éste se torna demasiado ácido, esto inhibe a las bacterias formadoras de metano, dando como resultado un incremento en la proporción de dióxido de carbono en el gas.

Las causas por las cuales ese descenso del pH puede ocurrir son entre otras un aumento brusco de la carga, cambios súbitos de temperatura, o presencia de elementos tóxicos.

En algunos casos el pH bajo puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como carbonato de sodio. Un valor normal de pH en una planta de biogas está entre 7 y 8 (17).

e) Efecto de Toxinas

Los antibióticos, desinfectantes y pesticidas son manejados para destruir las bacterias y parar así el funcionamiento del digestor. Los hidrocarburos clorados, tales como cloroformo y otros solventes orgánicos, son particularmente tóxicos para la digestión anaeróbica (17).

f) Tiempo de Residencia

El tiempo que permanecen los sólidos volátiles en un digestor es una parte fundamental del proceso y representa el tiempo promedio que la materia orgánica es atacada por los microorganismos. Este tiempo determina la fracción de gas que se obtenga de la producción máxima que es posible obtener a tiempos de residencia muy largos. De aquí es necesario llegar a un compromiso -

entre el volumen de gas que se va a producir y el tiempo de reten
ción a que se obtiene.

Para digestores de carga contínua (una vez al día), la re
ducción del tiempo de residencia hasta valores tan bajos como 10
días incrementa la producción de gas para un mismo volumen de di-
gestor.

La cantidad de gas que es posible obtener a partir de una
masa dada aumenta al aumentar el tiempo de residencia.

La selección del tiempo óptimo de residencia estará en -
función de las necesidades energéticas locales, y de la disponibi-
lidad de materia prima y mano de obra. Para un volumen dado de -
digestor, la operación a un tiempo de residencia corto, que produ-
ce una mayor cantidad de gas que la operación a un tiempo largo,
implicará un aumento sustancial de la materia prima que deberá -
cargarse diariamente, lo que trae consigo un aumento de las ho-
ras-hombre requeridas.

El tiempo de retención de la materia orgánica en un digeg
tor, está fuertemente ligado a la temperatura de operación, ya -
que al trabajar a temperaturas cada vez más cercanas a la óptima
de 35 °C, los tiempos de retención se hacen cada vez menores (al -
conseguirse mayores velocidades de producción), aprovechándose me-
jor el volumen del digestor y obteniéndose además una mayor canti-
dad de gas por kilogramo de materia orgánica procesada (12).

Capas de Subproductos en el Digestor

El digestor se alimenta con una mezcla de agua y desechos, que se denomina lechada. En el interior del digestor, la carga diaria de lechada fresca fluye por el extremo y desplaza a la carga del día anterior que las bacterias y otros microorganismos ya digirieron.

Cada carga avanza a lo largo del digestor hasta un punto en el que las bacterias de metano se encuentran activas, en este punto, grandes burbujas se abren paso hasta la superficie, donde se acumula el gas.

La digestión se va reduciendo gradualmente hacia el extremo de salida del digestor, los residuos comienzan a estratificarse en capas distintas, como se demuestra en la figura No. 16.

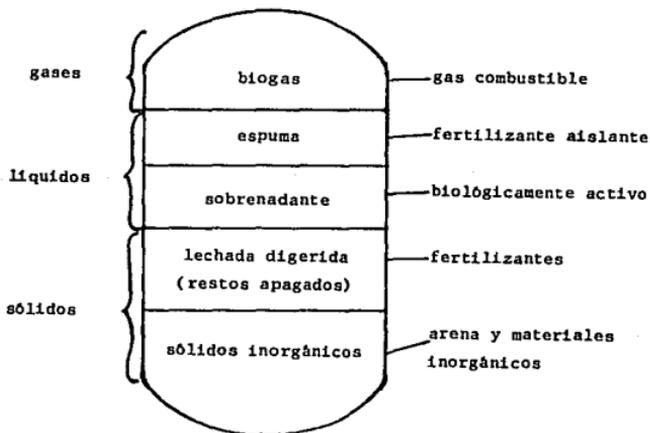


Figura No. 16. Capas de Subproductos en el Digestor (38).

La capa de los residuos sobrenadantes corresponde a los líquidos apagados de la lechada original, el valor fertilizante del líquido es muy elevado como el de los sedimentos.

La capa correspondiente a la espuma es una mezcla de material fibroso grueso, liberado del estiércol bruto, gas y líquido, la espuma puede ser un material aislante.

El Biogas

La producción de gas metano a partir de desechos orgánicos limpia realmente el medio de desperdicios, puesto que convierte la basura y los desechos agrícolas en combustibles y fertilizantes. El metano con una clasificación de 20 octanos es un combustible que se quema por completo.

En la práctica el gas producido consta de 55 a 60% de metano, 40 a 45% de dióxido de carbono y cantidades menores de hidrógeno, nitrógeno, sulfuros orgánicos e hidrocarburos superiores. Su valor promedio de poder calorífico es de 5335 Kcal/m^3 , en comparación con el del gas natural que es de 9185 Kcal/m^3 , cuya composición incluye 98% de metano (27).

Existen métodos para purificar el gas, la eliminación de dióxido de carbono es costosa y no parece necesaria. El vapor de agua se puede eliminar haciendo pasar el gas a través de un separador de líquidos, que consiste en un recipiente que guarda una temperatura más baja que el biogas, para condensar el vapor de agua y atraparlo.

Los métodos de distribución y/o almacenamiento varían según el uso que se pretenda dar al gas, aunque se presentan proble

mas, puesto que el metano no se licúa bajo presión a temperatura ambiente (17).

El Bioabono

Corresponde a los sólidos apagados del estiércol original, es un buen fertilizante para cultivos de plantas y su composición varía de acuerdo al desecho utilizado, y en promedio un análisis en base seca es el siguiente (27).

materia orgánica	85.0%
nitrógeno	2.6%
fósforo	1.5%
potasio	1.0%
pH	7.5

El bioabono no posee mal olor, ni contamina, tampoco atrae moscas, puede ser aplicado directamente al campo en forma líquida o bien ser deshidratado y almacenado para usarse posteriormente.

C A P I T U L O VI

APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR DIRECTA

Se conocen varias formas de aprovechamiento de la energía solar directa (ver el cuadro 1 en la página 37). Puede captarse - con sistemas fotovoltaicos o fotoquímicos para convertirse directamente en energía eléctrica o energía química, respectivamente; - o bien puede aprovecharse como fuente de energía térmica mediante colectores solares, ya sea para su uso como tal, o como paso intermedio para su conversión en energía mecánica o eléctrica mediante procesos termodinámicos (16).

El cuadro 1 muestra las rutas básicas de aprovechamiento de la energía solar directa, a su vez cada ruta tiene sus usos y aplicaciones específicas, éstas se tratan cada una por separado.

1) Transformación Térmica

1.1) Aplicaciones Directas

Son muy variadas las aplicaciones directas de la energía solar como fuente de energía térmica. Los sistemas considerados - en este trabajo son: calentadores de agua para uso doméstico y al bercas, climatización de viviendas, refrigeración, destiladores - de agua, secadores, cocinas, invernaderos y bombas.

a) Calentamiento de agua

Generalmente, el calentamiento del agua se logra en la ac tualidad con combustibles tradicionales como gas natural, gas LP, petróleo, leña, etc.. Sin embargo, dados los bajos niveles de temperatura que se requieren en el calentamiento de agua para uso --

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

doméstico (del orden de 40-60 °C), la sustitución de la energía solar por los combustibles antes mencionadas constituye una alternativa sumamente atractiva para el ahorro de energéticos.

Un calentador solar de agua consiste básicamente en un colector plano conectado a un tanque de almacenamiento de agua; en la actualidad se conocen dos formas de calentamiento de agua: el de circulación natural y el de circulación forzada (16,25).

a.1) Calentamiento de agua con circulación natural

Todos los calentadores de agua mediante energía solar consisten en un colector que recibe la energía incidente durante el día y un tanque de almacenamiento que contiene el agua que ha sido calentada. La figura No. 17 muestra un calentador típico operando en condiciones de circulación natural (25); en el cual, el calor es absorbido por el agua en el punto más bajo del sistema. Esto causa un incremento en la temperatura del agua dentro del colector y una consecuente disminución en la densidad de ésta. En estas condiciones la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque. Esta circulación natural continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer las caídas de presión en el sistema (25). En este tipo de calentadores es común clasificar a los sistemas con circuito termosifón (32).

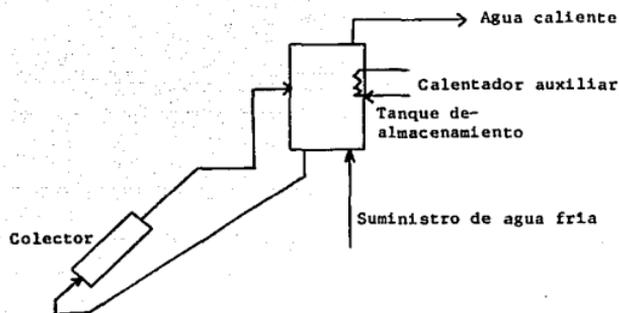


Figura No. 17. Calentador de Agua con Circulación Natural(25).

a.2) Calentamiento de agua mediante circulación forzada

La figura No. 18 muestra un sistema de calentamiento de agua mediante circulación forzada. Nótese que en este caso se ha incluido un circulador y un control automático. El circulador es una bomba que hace circular el agua a través del sistema. Por otra parte, el control diferencial hace actuar la bomba cuando la temperatura en el colector es mayor que la del tanque de almacenamiento por un valor establecido, por ejemplo, 10°C . Similarmente, éste desconecta la bomba cuando la temperatura del colector se aproxima a la del tanque de almacenamiento, por ejemplo, dentro de unos 5°C (25,32).

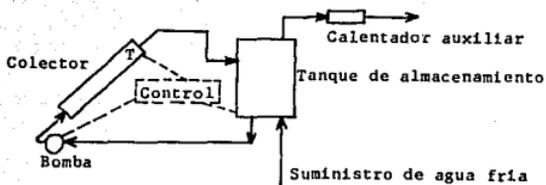


Figura No. 18. Sistema de Calentamiento de Agua por Circulación Forzada (25).

Actualmente, la mayoría de los calentadores de agua para uso doméstico se combinan con un calentador convencional de gas y se reportan ahorros hasta de 60% en combustible. Así, se ha estimado de manera preliminar un plazo entre 4 y 8 años para recuperación del costo inicial del calentador solar en base al combustible ahorrado (16).

En Australia, Chipre, los Estados Unidos y el Japón ya se utilizan a escala relativamente grande, calentadores de agua por energía solar. Han superado ya la etapa de investigación y desarrollo y de proyectos piloto y la tecnología es confiable y bien conocida (35). En el mercado internacional se dispone de varios modelos; el más común de ellos tiene un colector solar de placa plana de 2 m^2 y un depósito de almacenamiento de 200 litros.

Por otro lado, es muy amplio el potencial de empleo de calentadores solares de agua para procesos agroindustriales. Se estima que en México el 40% del consumo industrial de energía se emplea para calentar agua y aire a temperaturas inferiores a los 200°C . Indudablemente que la evolución en el precio de los hidro-

carburos influirá de manera importante en la difusión de los calentadores de agua (16).

b) Calentamiento de agua de piscinas

Todo proyecto destinado a popularizar el uso de la energía solar debe cumplir algunas de las condiciones siguientes --

(35):

- Presentar ventajas económicas,
- Beneficiar a la mayor cantidad posible de personas,
- Ser visitado por muchas personas.

Los proyectos relativos al calentamiento de agua de las piscinas significan por consiguiente un excelente medio para dar a conocer al público la tecnología de dicho tipo de energía. En comparación con algunos de los numerosos usos posibles de la energía solar, tales proyectos presentan importantes ventajas entre las que se encuentran las siguientes:

- Las temperaturas de trabajo son relativamente bajas,
- No es necesario un calentamiento auxiliar.

Así, cabe mencionar que para tiempos de permanencia muy breves o después de un baño sauna, practicamente cualquier temperatura es aceptable. Por otra parte, el agua usualmente se acondiciona a 22°C.

Una alberca con agua bien filtrada y una profundidad promedio de 1.60 - 1.70 metros absorbe para su calentamiento entre el 75 y 85% de la energía solar incidente. Aproximadamente el 5% de esta energía incidente es reflejada sin producir calentamiento

(25).

c) Calentamiento de espacios

Puesto que aproximadamente la cuarta parte del consumo mundial de combustible se utiliza para la calefacción de edificios, es evidente que la utilización de la energía solar puede conducir a un ahorro de las reservas mundiales de carbón, petróleo y gas (9).

El ahorro de energía varía del 30 al 80% del calor total consumido. Entre otras cosas, depende de las condiciones climáticas de la forma, ubicación y orientación del edificio, del número de pisos, de los materiales utilizados en la construcción y la modalidad de utilización de los locales (35).

La calefacción solar se realiza en su totalidad con colectores planos montados horizontalmente en un techo plano, inclinados hacia el ecuador sobre un tejado (9).

Cuando se emplea energía solar para calentar locales se recurre por lo general a dos modalidades de calentamiento pasivo y activo (16, 35).

Los sistemas pasivos emplean la arquitectura misma de la vivienda para coleccionar, almacenar y distribuir la energía calorífica. En la figura No. 19 se ilustra el principio del sistema pasivo, en el cual la radiación solar calienta la superficie absorbente; el espacio entre esta superficie absorbente y la doble placa de vidrio es un conducto en el que el aire se calienta y se eleva por efecto de termosifón, penetrando después en el espacio que se ha de calentar por una abertura ubicada en la parte superior de la pared. A medida que el aire caliente va cediendo su calor al local se va enfriando, desciende y regresa al conducto.

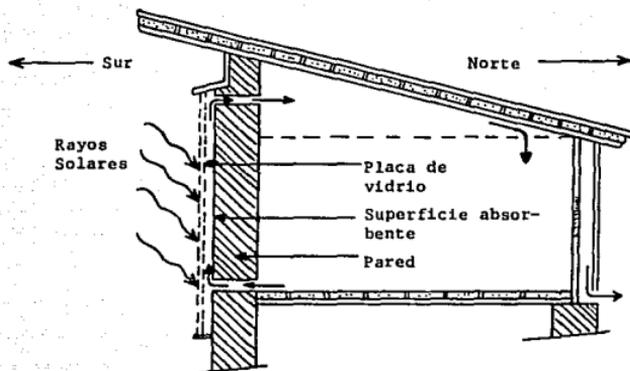


Figura No. 19. Sistema Pasivo de Calefacción de locales mediante Energía Solar (35).

Las paredes constituyen el sistema de almacenamiento. En Odeillo, al sur de Francia, este sistema ha suministrado del 60% al 70% de la energía total necesaria para calefacción (35).

Los sistemas activos son, en general, más eficientes que los pasivos. En ellos, el transporte y distribución del calor se realiza mediante una bomba o un ventilador para forzar la circulación del fluido empleado lo cual requiere del consumo de otros energéticos. Además, la captación de energía solar se realiza usualmente con colectores más eficientes (16).

Los sistemas activos de climatización solar requieren para su construcción y mantenimiento inversiones más altas que los pasivos. Esto, aunado a las características climatológicas y de inso-

lación del país, indica que en la mayoría de los casos la solución más viable a problemas de climatización solar es el sistema pasivo. Por ejemplo, para propósitos de calefacción en el norte del país - y en algunas zonas del altiplano, los sistemas pasivos permiten prescindir de calentadores que operan con combustibles fósiles - (16).

d) Refrigeración Solar

Cuando la energía solar se utiliza para hacer funcionar máquinas de refrigeración, la refrigeración se obtiene en aquellos casos donde más se necesita. Además de mejorar la salud y la comodidad de la gente que trabaja en climas cálidos, con el consiguiente aumento de su productividad, la refrigeración permite la conservación y almacenamiento de alimentos perecederos, que de otro modo se perderían en grandes cantidades en los países tropicales. Se dice que la cuarta parte de los alimentos vegetales que se cultivan en el mundo se descomponen antes de que se puedan comer. Una refrigeración entre 5 - 10 °C puede ampliar en gran medida el tiempo de almacenamiento de ciertos víveres, especialmente la fruta y las verduras. Como ejemplo tenemos la conservación de los plátanos en barcos, en vagones de tren y en almacenes permanentes durante periodos de semanas y de meses. En algunos casos favorables, es posible almacenar alimentos de una cosecha hasta la siguiente - (4).

Los sistemas más comunes de refrigeración son el de compresión y el de absorción. Ambos pueden adaptarse para funcionar con energía solar ya sea mediante su conversión en energía mecánica o eléctrica para alimentar al compresor de un sistema convencional -

o empleándola como fuente de energía térmica para el ciclo de absorción (16).

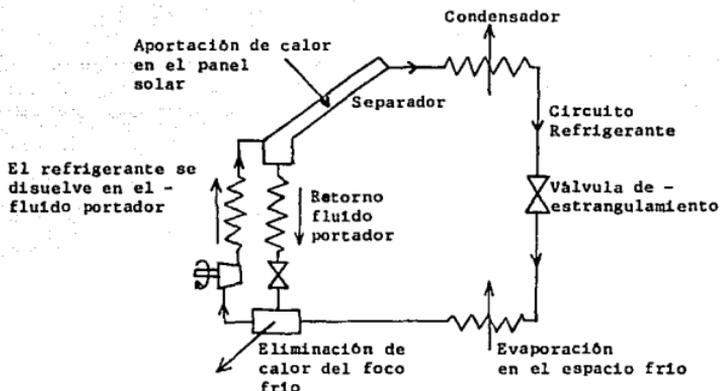


Figura No. 20. Refrigerador de Absorción por Energía Solar (4).

En la refrigeración por absorción, el sistema se adapta para funcionar con energía solar, ya que sólo requiere que se le aporte calor. El compresor del ciclo de refrigeración de vapor se sustituye por un sistema en el que el refrigerante (amoníaco) se disuelve en otro (agua) a baja temperatura, al aplicarse presión por bombeo separándose los fluidos por calentamiento. El proceso es posible por que la solubilidad del refrigerante es mayor a baja temperatura. Debido a que sólo se bombea líquido, que tiene una compresibilidad despreciable, el trabajo que hay que aportar es nulo, y en efecto, el sistema funciona con la energía que se-

aplica al generador (4).

e) Destilación Solar

La moderna aplicación de la energía solar para la destilación de aguas salinas se inició en 1872 con la instalación en el Norte de Chile de un alambique solar tipo alberca que durante muchos años abasteció de agua a una población minera. Este alambique que consistía en una serie de tubos paralelos, de 1.14 metros de ancho por 61 metros de largo, con una superficie total de -- 4,700 m². La alberca era de madera ennegrecida con tinte de Campeche y alumbre para absorber la luz del sol (35).

Existen varias técnicas posibles para obtener agua potable a partir de agua contaminada que incluye la destilación con energía solar de condensación sencilla o múltiple (9). En la figura No. 21 se muestra uno de los sistemas más sencillos.

En el destilador solar el agua no potable entra en el recipiente situado en el fondo donde se calienta por la absorción de energía solar. Por lo general el fondo del recipiente se pinta de negro para facilitar este proceso, ya que el agua es prácticamente transparente para las radiaciones de onda corta procedentes del sol. A medida que aumenta la temperatura, el movimiento de -- las moléculas se hace más enérgico, pudiendo abandonar cada vez en mayor número la superficie. La convección del aire de la superficie las acarrea, produciéndose la evaporación. La corriente de aire ascendente, cargado de humedad se enfría en contacto con la lámina de recubrimiento transparente y no retiene la cantidad de agua, parte de la cual se condensa en la lámina y escurre hasta-

los canales situados en los bordes. El aire así enfriado vuelve - para completar la corriente de convección (4).

Los límites de la destilación solar vienen impuestos por el calor de vaporización del agua y por la cantidad de radiación solar disponible. Para calentar 1 gramo ó 1 cm³ de agua de 29 °C a 50 °C y evaporarlo se requieren más de 500 calorías. En un día soleado y brillante alrededor de 500 calorías de radiación solar inciden sobre 1 cm² de superficie horizontal. Si se utilizase todo este calor en la evaporación sería posible teóricamente destilar una capa de agua de 1 cm. Si se toma una eficiencia del 35% el agua destilada diariamente será de 3.5 mm (9).

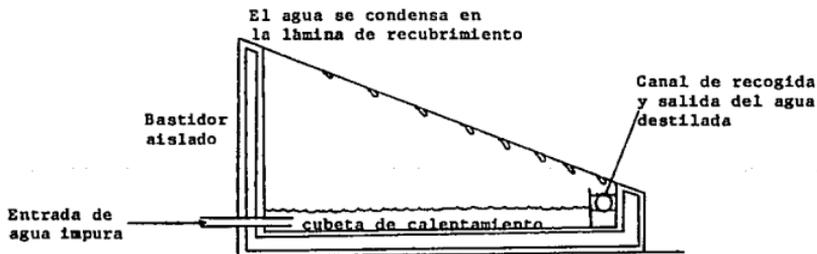


Figura No. 21. Destilador Solar (4).

Se pueden conseguir eficiencias del 35% y una producción de 4 l/m^2 con distintos tipos de alambiques solares con días brillantes, soleados y aire templado. Con algunos diseños se pueden obtener rendimientos del 50 al 60% (16, 35).

f) Secado Solar

El proceso de secado consiste en elevar la temperatura del aire del medio ambiente. Usualmente el aire se calienta 10 ó 15°C para disminuir a menos de la mitad su humedad relativa respecto al medio (16).

Las dos fases principales del proceso utilizado son el calentamiento solar del fluido (aire) y el secado mismo, en el que el fluido ya calentado extrae la humedad del material que se ha de secar (35). La primera fase se cumple de dos maneras: 1) Indirectamente mediante colectores solares calentadores de aire, utilizando la convección natural o forzada para precalentar el aire ambiente y reducir su humedad relativa; 2) directamente, calentando en el lugar mismo el aire, que a su vez deshidrata directamente en producto.

La absorción de calor por el material suministra la energía necesaria para evaporar el agua que contiene, aproximadamente 2.5 kilojoules (590 calorías) por gramo de agua evaporada (9, 35).

Como el secado se efectúa a una temperatura que no excede a la del aire exterior, no es necesario usar los colectores focales complicados, es suficiente con los colectores planos sencillos de vidrio o plástico.

El maíz, el trigo y otras cosechas tienen un contenido muy

alto de humedad (20%) que no se pueden almacenar sin un fuerte deterioro o pérdida de calidad. Para producir un buen grano es necesario un secado durante el almacenamiento. El forraje fresco puede tener hasta un 40% de humedad y si se coloca en graneros la oxidación acelerada puede subir la temperatura y producir una combustión espontánea.

La evaporación de agua de mar para producir sal, es una de las industrias químicas más antiguas, cuando la sal se cristaliza una gran cantidad de luz solar se refleja fuera de la solución, - se han realizado experimentos consistentes en teñir la sal para aumentar la absorción de luz solar (9).

g) Cocción solar

En las zonas en desarrollo se han utilizado diversos combustibles tradicionales para cocinar, figuran entre ellos los siguientes:

	Valor calorífico aproximado	
	(MJ/Kg)	(Mcal/Kg)
Estiércol animal seco	9	22
Leña	20	48
Carbón vegetal	33	80
Coque	30	72
Queroseno, petróleo	42	10

Al desarrollar tecnologías para la cocción con energía solar, no deben repetirse las ineficiencias que se encuentran en los sistemas existentes, especialmente en los países en desarrollo, -- donde la cocción de alimentos puede representar hasta un 80% de toda la energía utilizada (35).

Existen tres tipos básicos de estufas solares (16, 35); el primero consiste en una caja con fondo negro y una o mas cubiertas transparentes que se complementan con un concentrador cónico o con un conjunto de tapas con la cara interior reflejante que al abrirse y colocarse con determinada inclinación, forman un concentrador piramidal y aumentan la radiación que recibe la caja. Un segundo tipo consiste en un concentrador parabólico con un brazo o base en su foco para sostener recipientes (ver la figura 22). El tercer tipo consiste en un colector plano (por el que circula el agua) y una cámara aislada que recibe el vapor para cocinar.

Las ventajas de estas estufas radican en que las de enfoque alcanzan temperaturas altas, pero requieren reorientarse y sólo aprovechan la radiación directa, además de que pueden o no adaptarse a técnicas particulares de preparación de alimentos (16).

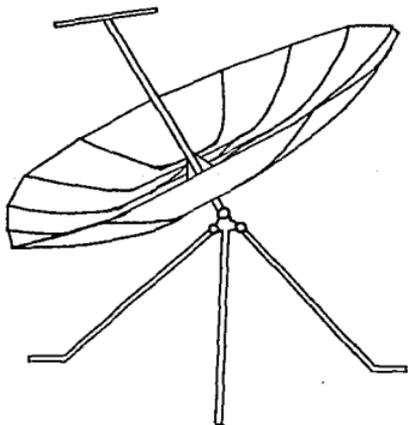


Figura No. 22. Cocina Solar con Reflector Parabólico adaptable, tipo sombrilla (35).

h) Bombas solares

Las máquinas solares pueden accionar bombas de tipo tradicional, en la cual un fluido se expande al absorber calor a una temperatura superior y se contrae al cederlo a menor temperatura. El trabajo mecánico producido en la expansión mueve un pistón dentro de un cilindro o hace girar la turbina (9).

Una estación de bombeo solar consta de lo siguiente (35).

1) Batería de colectores de placa plana en los cuales el agua u otro líquido portador de calor circula en circuito cerrado;

2) Un termopermutador dentro del cual el calor se transfiere del fluido que circula en los colectores al fluido que circula por el circuito del motor, ocasionando la evaporación de este último;

3) El circuito del motor que comprende el motor de expansión, condensador y una bomba de reinyección;

4) El circuito de bombeo que comprende un motor hidráulico que acciona la bomba de un pozo, cuando se trata de instalaciones de pequeña potencia (1 kilowatt), o un alternador y un motor eléctrico que acciona una o varias bombas, tratándose de potencias más elevadas (25 - 50 kilowatts).

En México, la primera instalación solar dedicada al riego se estableció en San Luis de la Paz, Guanajuato en el año de 1975 y consiste en una instalación de 30 kilowatts que produce electricidad para accionar bombas centrifugas, funciona sustituyendo el motor de expansión por una turbina que acciona un alternador, la superficie de los colectores solares de 1,500 m² y el caudal de

bombeo para una elevación de 40 metros es de $150 \text{ m}^3/\text{hr.}$ como promedio.

Esta central solar produce 900 m^3 de agua diarios. El agua bombeada desde 40 metros de profundidad se distribuye a 15000 habitantes y es posible que se emplee para regar de 20 a 30 hectáreas de cultivos. El espacio disponible debajo de la superficie de 1500 m^2 de los colectores solares se utilizará para la instalación de una granja experimental

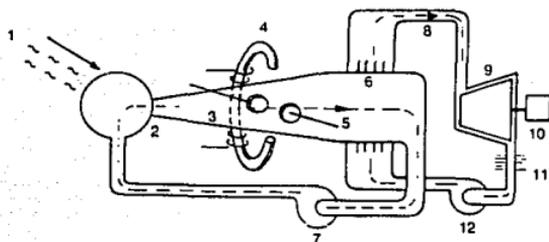
i) Invernaderos

La función de un invernadero es suministrar a las plantas en todas las estaciones del año, la luz y el calor para su crecimiento óptimo, el proceso mediante el cual se mantiene el balance térmico de un invernadero es conocido como efecto invernadero. En el efecto invernadero, la luz al pasar por un vidrio transmite la radiación de longitudes de onda larga (infrarrojo). Si en la parte interior tenemos un material para absorber la radiación, al saturarse emitirá radiaciones de onda larga que al no poder atravesar el vidrio quedarán "atrapadas", aumentando la temperatura de los objetos interiores (35).

1.2) Conversión en Energía Mecánica y Eléctrica

Existen proyectos en los cuales el vapor producido por colectores con concentradores ópticos sirve para generar energía eléctrica, por medio de un generador magnetohidrodinámico (MHD) (ver la figura No. 23). Este generador es una especie de dínamo sin elementos giratorios. El vapor recalentado que circula por el circuito se enfría en el generador MHD, produciendo energía eléctrica.

El sistema de colectores vuelve a elevar la temperatura del vapor (aproximadamente 2,500 °C) (6).



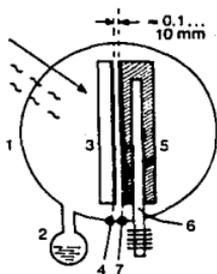
- | | |
|---|---|
| 1) colector (caldera) | 7) compresor y bomba de circulación |
| 2) difusor | 8) circuito secundario |
| 3) corriente gaseosa ionizada | 9) turbina |
| 4) imán, cuyo campo desvía los electrodos. De esta forma, se suministra energía eléctrica a un sistema de consumo, conectado a los electrodos | 10) generador |
| 5) electrodos | 11) condensador |
| 6) intercambiador de calor | 12) bomba de circulación del circuito secundario. |

Figura No. 23. Generador Magnetohidrodinámico (MHD) (6).

Las centrales de energía con generadores MHD en base al esquema de la figura 23, pueden alcanzar un rendimiento comprendido entre 40 y 50%. El rendimiento de las centrales térmicas conven--

cionales es de aproximadamente el 42% (6). En la caldera (1), los gases alcanzan una temperatura de 2,500 °C y en el difusor (2) alcanzan velocidades de 1,000 m/seg. El calentamiento puede realizarse por medio de radiaciones solares o por combustión.

El profesor E. Peschka del "Instituto para la Transformación de Energía y Accionamientos Eléctricos" de Stuttgart, Alemania, propone que se utilicen los convertidores termoiónicos (ver la figura 24).



- 1) carcasa, caldera
- 2) depósito con Cesio
- 3) electrodo-emisor, se calienta, por ejemplo, por medio de radiaciones solares.
- 4) conexión del electrodo
- 5) electrodo-colector, capta los electrones que se emiten de 3, por efecto de calentamiento.
- 6) conductor térmico
- 7) conexión del electrodo.

Figura No. 24. Convertidor Termoiónico (6)

Con los convertidores termoiónicos se pueden alcanzar rendimientos del 15% con temperaturas de servicio cercanas a las 1,200 °C. Se supone que este rendimiento se puede elevar hasta el 20% bajando a su vez la temperatura de servicio a menos de 1,100 °C. El calor residual (800 °C) se puede utilizar en un segundo escalón en una central térmica convencional, con lo que el rendimiento conjunto se podría elevar hasta el 50 ó 60% (6).

La navegación aeroespacial ha ocasionado investigaciones en el campo de la termoelectricidad, con el fin de desarrollar generadores para las naves espaciales, pero los generadores termoeléctricos, se desecharon al desarrollar las células solares (1954), por su bajo rendimiento frente a éstas (cerca del 6%) y por la necesidad de dotar a los generadores de espejos parabólicos, ya que se requirieron temperaturas de servicio cercanas a 1,000 °C.

No se ha logrado rebasar aún la fase experimental de los generadores termoeléctricos, la causa principal radica en su bajo rendimiento y en su elevado precio debido a la fase de desarrollo en que se encuentra actualmente (6).

2) Generación Fotovoltaica de Energía Eléctrica

La producción de energía eléctrica directamente a partir de radiaciones luminosas (luz visible e infrarrojos), asegura a las células solares un amplio campo de aplicación. Su rendimiento actual es de 5 al 16%.

La tabla 5 muestra las aplicaciones de las células solares en diferentes campos técnicos, e indica los tipos de acumuladores más apropiados para cada campo de aplicación (6).

De un punto de vista histórico, la plataforma de lanzamiento de las células solares fueron los satélites artificiales que transportan su propio generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos, transmisión y meteorológicos. En competencia con otros generadores (termoeléctricos, pilas de combustible, etc.) las células solares presentaban algunas ventajas: peso redu-

cido, larga vida, ocupación de espacio mínimo, nivel de insolación elevado y continuo, ya que el satélite se mueve fuera de la atmósfera en órbita geosíncrona, etc. Los ejemplos de esta aplicación son abundantes y, de hecho, en la actualidad casi todos los satélites para fines pacíficos (meteorológicos y de comunicación) generan la energía que precisan mediante paneles fotovoltaicos incorporados en su superficie exterior o transportados en alerones extensibles, por ejemplo el Skylab americano que se alimentó con paneles fotovoltaicos de potencia máxima de 15 kilowatts (26).

La electrificación de zonas rurales por los medios convencionales supone, generalmente, una inversión de baja rentabilidad, ya que deben realizarse extensiones de líneas amplias y difíciles a núcleos de población reducidos y con muy bajo consumo eléctrico. Estas circunstancias determinan la existencia de numerosas zonas rurales no electrificadas.

En relación a las instalaciones agrícolas y ganaderas, hay que constatar que diferentes tipos de granjas de crianza (pollos, cerdos, etc.) obtienen la energía eléctrica que consumen (iluminación, ventilación, etc.) a partir de generadores fotovoltaicos. Es favorable el hecho de que estas granjas se construyen alejadas de los núcleos de población por razones de higiene. Sin embargo, la aplicación de mayor impacto y futuro de los generadores fotovoltaicos en la agricultura es la alimentación de sistemas de bombeo de agua y riego por goteo de productos de alto valor, riego a baja presión, bombeo para viveros, etc. Las instalaciones de mayor potencia que existen son experimentales, por ejemplo, la de Mean (N_e brasca) de 25 kilowatts capaz de regar 33 hectáreas en la época de

riego y proporcionar energía para el secado del grano una vez que se ha recogido la cosecha de maíz. Para bombear altos caudales, la realización de un generador fotovoltaico no ofrece dificultades técnicas y la única limitación existente es la inversión requerida.

La televisión escolar es un sistema de enseñanza eficaz en aquellos países donde no se cuenta con centros y profesorado suficientes. Generalmente las zonas donde se aplica esta solución son aisladas o de bajo nivel de desarrollo y carecen de electrificación. Dentro de una acción más variada se contempla la existencia de unidades móviles que, alimentadas eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos, recorren zonas aisladas difundiendo información mediante medios audiovisuales (26).

La utilización de la electricidad fotovoltaica en la industria ofrece amplias expectativas, pero en aquellas donde el consumo es de corriente continua. Se destaca la obtención de metales (cobre, aluminio, etc.) por electrólisis y la fabricación de acumuladores electroquímicos. Por ejemplo, la Universidad Central de Santiago de Chile cuenta con una instalación piloto de 144 paneles fotovoltaicos convencionales que proporcionan energía para el refinado de cobre.

El primer reloj solar de pulsera fué el Citizen Quarz Cryston con esfera analógica y se presentó al público en Febrero de 1974. Ocho células solares cargan el acumulador a través de un diodo de cierre (que impide el retroceso de la corriente durante la obscuridad). El acumulador es una célula de óxido de plata, una resistencia antepuesta al acumulador impide la sobrecarga

Aplicación	Acumulador de Níquel sistema níquel-cádoio		Acumulador de plomo sistema Pb-Ni ₂ SO ₄ /PbO ₂		
	Planchas sintéticas herméticas	Planchas de bolalillo abiertas	Modelos pequeños	Baterías de arranque	Pós.gran superficie modelos
Transformador de TV y FM		x			x
Plataformas de perforación		x			x
Necesidades de viviendas, situadas en zonas despo- bladas		x	x		x
Necesidades de expedicio- nes	x				
Sistemas indicadores de incendios	x	x	x		
Balizas	x	x	x		
Radio en la navegación aérea y marítima	x	x	x		
Red telefónica en zonas alejadas	x	x	x		x
Sistemas de auxilio y alarmas de carreteras	x	x	x		
Estaciones meteorológi- cas, ecológicas	x	x	x	x	x
Refugios (radio y energía eléctrica)		x	x	x	x
Paseo a desnivel de ferru carril, situados en zonas despo- bladas		x			x
Puntos de vigilancia en oleoductos, gaseoductos.		x	x	x	x
Herramientas (montaje, - reparación)			x	x	
Baterías de barcos y ve- leros		x	x	x	
"Roulottes": pequeña nave- ra, iluminación		x	x	x	
Instalaciones de bombeo de agua		x	x	x	
Radios de transistores	x		x		
Televisión portátiles			x	x	
Relojes*, calculadoras de bolalillo*, linternas, encendedores, audifonos.	x				
Juguetes, aeromodelismo	x		x		
Sistemas de alarma	x	x	x	x	

* Para su aplicación, se emplean células de óxido de plata.

Tabla No. 5. Aplicaciones Fotovoltaicas para Diferentes Campos Técnicos (6).

cuando la luminosidad sea muy fuerte.

El reloj precisa como media semanal, una hora de fuerte luz solar. El fabricante indica que durante esta hora, la luminosidad debe ser de 20000 lux. Si ésta fuese menor, se precisaría una exposición durante un mayor tiempo. La célula de óxido de plata tiene una vida superior a 5 años (6).

Por otra parte un sistema fotovoltaico autónomo comprende lo siguiente: el generador electrosolar, es decir, el o los módulos fotovoltaicos, el banco de baterías y el control de carga, también si es necesario se puede adoptar un convertidor o inversor CD/CA, como se muestra en la figura No. (25).

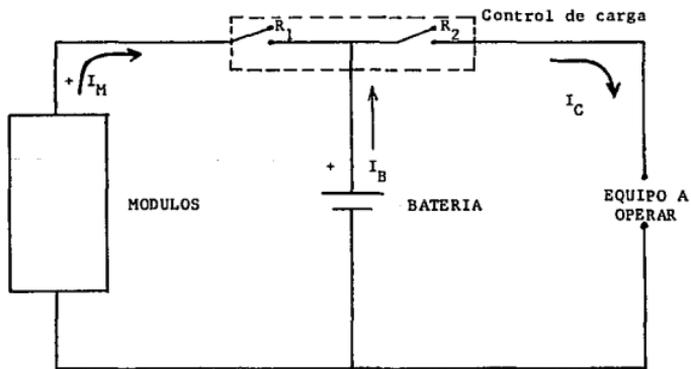


Figura No. 25. Esquema de un Sistema Fotovoltaico (34).

El Control de Carga

Su objetivo es evitar que la batería se llegue a sobrecargar y también, que la batería baje a un voltaje mínimo (descarga profunda). En caso de falla incluye fusibles, indicadores luminosos, etc., y centraliza el cableado de sistema. A menudo incluye además un diodo de bloqueo en serie entre módulos y baterías, para evitar que éstas se descarguen por la noche en los módulos.

El Convertidor o Inversor CD/CA

El inversor CD/CA convierte el voltaje de una fuente de 12 volts (CD), por ejemplo una batería a 117 volts (CA). Permite operar por tanto aparatos de corriente alterna convencionales, a partir de sistemas que generan 12 volts de corriente directa tales como baterías de automóviles, sistemas solares fotovoltaicos o generadores eólicos.

Con el convertidor se puede conectar una televisión a color, radiograbadora, sonido chico, ventiladores de mesa, focos incandescentes, licuadora, taladro de mano, etc. (34).

3) Aplicaciones Fotoquímicas

Aunque algunos de los resultados en este campo han sido de gran importancia para la humanidad, como el desarrollo de la fotografía, sus aplicaciones prácticas a gran escala hasta ahora han sido pocas. Sin duda esto se debe en parte a las dificultades inherentes a la propia experimentación sobre el tema. Hasta hace poco no había sido posible estudiar las etapas iniciales de las reacciones fotoquímicas que duran quizás un tiempo de una mi-

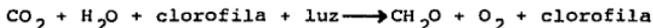
llonésima de segundo.

Ahora, cuando ya se están empezando a comprender estas -- primeras etapas, este campo se está desarrollando muy rápidamente. Debido a esto es necesario examinar algunas aplicaciones para demostrar que en el futuro signifiquen un gran avance en el tema de la conversión de energía.

Uno de los primeros procesos es la disociación del agua en sus componentes, hidrógeno y oxígeno. Si esto fuese posible, utilizando la energía de la radiación solar, obtendríamos un combustible transportable y almacenable de forma indefinida, a partir de una de las materias primas más baratas y abundantes.

La energía requerida para llevar a cabo la disociación, se podría recuperar quemando el hidrógeno con el oxígeno en un quemador o en un motor de combustión interna, o al recombinarse en un generador fotoquímico de combustible, produciendo una corriente eléctrica (4).

La reacción química de fotosíntesis, con la que se produce nuestra comida y combustible es la siguiente:



En esta reacción se pretende demostrar que en la planta se combinan dos reactivos esenciales, dióxido de carbono y agua, para formar carbohidratos liberando oxígeno. El oxígeno liberado, se obtiene en una cantidad de una molécula por molécula de CO_2 absorbida como lo muestra la reacción. Después de esta reacción primaria ocurren otras reacciones controladas o enzimas, que producen grasas, proteínas e hidratos de carbono (4,9).

C A P I T U L O V I I

APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR INDIRECTA

(EOLICA, BIOMASA)

1) ENERGIA DEL VIENTO O EOLICA

La energía proveniente del aire es inicialmente energía en forma de movimiento mecánico rotatorio, translacional u oscilatorio. Este movimiento mecánico puede ser usado para bombear fluidos o puede ser convertido a electricidad, calentar o como combustible (14). Algunas aplicaciones más eficientes son aquellas que usan energía derivada directamente del aire, fuera de un adicional tratamiento de energía, conversión o almacenaje.

Se puede decir que la energía del viento es una de las más flexibles y tratables de todas las fuentes de energía disponibles, debido a que la energía derivada directamente del aire puede ser convertida eficientemente y con facilidad a otras formas de energía. En la figura 26 se muestran las aplicaciones de la energía del viento o eólica (14).

1.1) Transformación de Energía del Viento a Mecánica

Los sistemas de conversión de energía eólica en mecánica pueden tener diferentes aplicaciones, entre ellas la realización de trabajo mecánico directo para la molienda de granos y el bombeo de agua para aplicación y de riego mediante turbinas de baja potencia, como el bombeo a gran escala para alimentar estaciones hidroeléctricas, se adaptan perfectamente a la irregularidad en el suministro de energía que caracteriza a los sistemas eólicos (5, 18).

El tipo de bomba que se utilice es determinante del compor-

tamiento del circuito, y su acoplamiento a las características de salida de la turbina es fundamental para que la instalación funcione en buenas condiciones. Las bombas de agua empleadas en sistema de conversión de energía eólica en mecánica, son generalmente de desplazamiento positivo o centrifugas.

Las bombas de desplazamiento positivo requieren de pares proporcionales a la carga, independientemente de la velocidad. Este tipo de bombas opera a muy bajas velocidades de viento siempre y cuando el par producido por la aeroturbina sea el requerido (1), las bombas de este tipo mas utilizadas son las de tipo pistón.

a) Bomba de tipo pistón

El sistema de tipo pistón es el que se viene utilizando por ser el más adecuado en aeroturbinas de rotor lento del tipo multi-pala o Savonius y la ventaja que presentan es que funciona con velocidades bajas, lo que permite acoplarlas a la turbina directamente (5). El mayor inconveniente de este sistema de bombeo es la irregularidad de su funcionamiento, puesto que el émbolo solo presenta resistencia cuando empuja el agua, esta dificultad puede solucionarse con un volante de inercia o con dos pistones alternativos.

b) Bombas centrifugas

Estas operan contra la carga y no arrancan sino hasta que la velocidad de rotación cede un mínimo (1). Su salida se incrementa con la velocidad, por lo que tiene una mayor capacidad de bombeo y aprovecha más la energía disponible a altas velocidades de viento, que las de desplazamiento positivo, además son más adecuadas para adaptarlas a los modernos aerogeneradores rápidos.

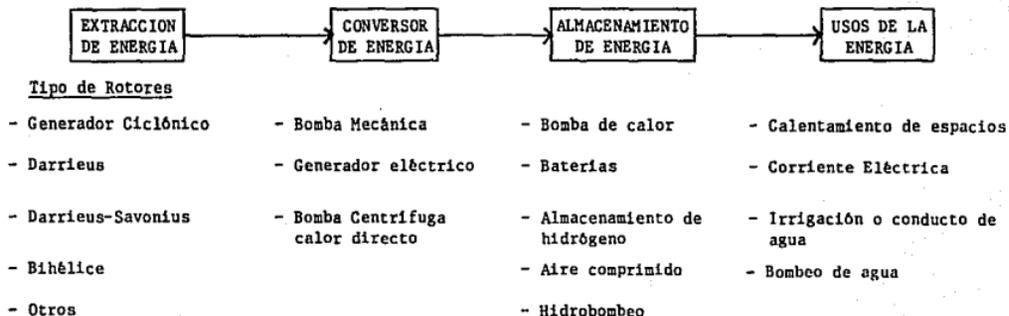


Figura No. 26. Aplicaciones de la Energía del Viento (14).

Otros tipos de bombas de menor uso son las siguientes --

(5, 39):

- Bombas de tornillo helicoidal
- Bombeo por transmisión
- Bombeo neumático
- Bombeo eléctrico

c) La Aerobomba

Una aerobomba es un sistema conversor de energía eólica donde de la energía captada del viento es utilizada para el bombeo de - agua por medios mecánicos. En general estos sistemas son utilizados para dotar de agua a una casa o poblado para usos domésticos, agrícolas de irrigación o drenaje.

Para este tipo de aplicaciones se usan rotores de alta solidéz (un alto porcentaje del área de espacio que barre el rotor está cubierta por las aspas), las más comunes en la actualidad son - las máquinas multipalas del tipo americano (18, 39).

El sistema completo consta del sistema conversor de energía eólica (S.C.E.E.), torre, tubería, bomba y depósito de almacena--- miento del agua bombeada. Los sistemas conversores se les puede agrupar de varias maneras.

- Por la posición de su eje
- Por la posición del rotor respecto a la torre
- Por las características de giro

Los sistemas más usados en el bombeo de agua debido a su alta eficiencia son los de eje horizontal. Asimismo éstos son del - tipo viento arriba, esto es, que el rotor se encuentra entre el - viento y la torre (14, 39). Respecto a las características de -

giro del rotor, en general estos sistemas conversores de energía eólica son de velocidad variable, esto es, que su velocidad angular varía según la velocidad del viento.

La transmisión del movimiento del rotor a la bomba se realiza a través de una caja reductora de velocidad cuya flecha de salida está acoplada a un conjunto "viela-manivela" y de aquí a través de una varilla, es transmitido el movimiento alternativo al émbolo de la bomba, localizada ésta en el fondo del pozo (29, 39).

La figura 27 muestra una aerobomba empleada para el bombeo de agua.

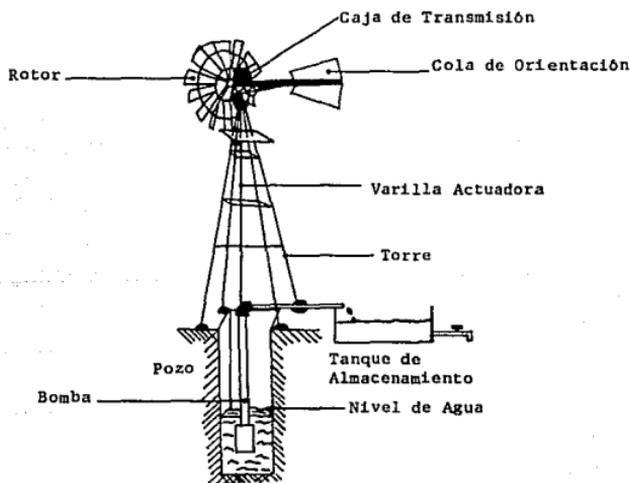


Figura No.27. Aerobomba que utiliza una Bomba de desplazamiento positivo del tipo Pistón (39).

d) Bombeo y compresión de aire

El bombeo de aire es otra forma de utilización de las turbinas eólicas de características parecidas al bombeo de agua. En este caso la potencia mecánica se manifiesta en la expulsión del fluido, o en su compresión (5). El bombeo de aire acepta dos variables claramente diferenciadas.

1) Los sistemas de aire comprimido se pueden utilizar para alimentar máquinas neumáticas como vehículos de transmisión para bombeo de agua, almacenamiento de energía, incluyendo la operación de turbinas de gas para generar electricidad durante los periodos de máxima demanda (1).

2) Los sistemas de ventilación se pueden utilizar para ventilar naves industriales, instalaciones frigoríficas, secadores, bodegas, minas subterráneas, etc..

En los sistemas de aire comprimido se bombea poca cantidad de aire con altos índices de compresión y se emplean compresores volumétricos que suelen ser del tipo pistón o de tornillo helicoidal (5).

En los sistemas de ventilación, en los que la cantidad de aire desplazada es elevada pero su compresión es muy pequeña, se utilizan ventiladores de tipo axial o de tipo centrífugo.

e) Hidrobombeo

En las aplicaciones de hidrobombeo, el viento puede ser usado para proveer potencia a bombas de agua de un depósito auxiliar abajo de una presa hidroeléctrica. Esto facilita el llenado del depósito principal de almacenamiento de agua cuando el viento sopla, con lo cual se suma a la capacidad de sistema hidroeléctrico

para generar potencia eléctrica de carga.

1.2) Aplicaciones de Calor Directo

El movimiento mecánico derivado de la potencia del aire puede ser usado para impulsar bombas de calor o para producir calor de la fricción de materiales sólidos o por la agitación de agua u otros fluidos, también por el uso de centrifuga u otro tipo de bombas que en combinación con el pequeño orificio, produce calor de fricción y turbulencia cuando el fluido pasa a través de ellos (14).

Este calor puede ser almacenado en materiales que contengan alta capacidad calorífica, tales como agua, aceros, sales eutécticas, o el calor puede ser usado directamente para aplicaciones como calentamiento y enfriamiento de agua y aire para residencias, comercios, industrias y edificios o para diversas aplicaciones de calor de proceso industrial o en agricultura.

Dentro de las posibles aplicaciones de calor de proceso en la agricultura incluyen operaciones de invernadero, secado de cosechas, procesos de leche, alimentos, refrigeración y ventilación (14).

Las aplicaciones industriales en donde se puede aplicar el calor a baja temperatura (175 °C) producida por energía del viento incluye lo siguiente:

- Producción de compuestos inorgánicos, por ejemplo: borax, sosa caústica, sodio metálico, bromo y cloro.
- Producción de materiales plásticos y sintéticos tales como polietileno, cloruro de polivinilo y poliestireno.
- Producción de compuestos químicos orgánicos, tales como

alcoholes y solventes, perfumes sintéticos y condimentos. Procesamiento de alimentos en los que se incluye la preparación y empaque de carne, deshidratación de frutas y vegetales, molienda de granos frescos, molienda de aceite - de soya, para lo cual el 80% del calor de proceso es usado a temperaturas menores de 175 °C.

- Procesos Textiles, vapor primario o aire caliente para secado, curado y terminado de hilos y textiles.

De éstos, alrededor del 25% es usado para calentamiento de proceso, 15% para enfriamiento y 62% para secado y deshidratación (14).

1.3) Producción de Energía Eléctrica

En la actualidad se usan ventiladores donde hace calor para producir una agradable brisa. Estos consisten en un motor eléctrico unido a unas aspas. El proceso inverso, es decir, aprovechar el viento para generar energía eléctrica es una de las aplicaciones más importantes de la energía eólica, y al aparato capaz de realizar esta conversión se le denomina aerogenerador.

El aerogenerador moderno está integrado por los siguientes componentes (39):

- torre; utilizada para soportar el aerogenerador y mantener el área del rotor en una zona libre de turbulencia, por efectos del terreno, árboles, construcciones, para captar mayor cantidad de energía, dado el incremento de velocidad del viento con la altura, generalmente son de tipo tubular o reticular construidas de acero.
- Rotor; formado por un conjunto de aspas de diseño aerodi

námico, cuyo número y tamaño pueden variar, construidas de fibra de vidrio, aluminio, madera epóxica o acero, - las aspas se unen en el centro del rotor y se acoplan a una flecha. Este sistema es el encargado de captar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica.

- Caja de transmisión; empleada para captar la velocidad angular de la flecha del rotor, con la velocidad angular de operación o nominal de los generadores eléctricos utilizados, además está conectado a un generador capaz de producir energía eléctrica.
- Generador; pueden ser dinamos que generan corriente continua o alternadores, éstos últimos pueden ser, a su vez de inducción (asíncronos) o de excitación (síncronos). Cada sistema de generación tiene diferentes características tanto de entrada como de salida.

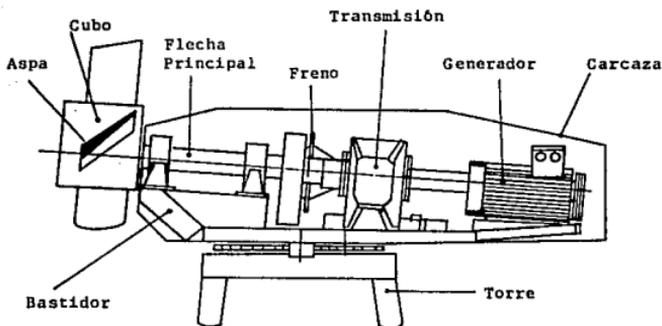


Figura No.28. Esquema de un Aerogenerador Moderno (39).

El generador crea una corriente eléctrica en líneas de transmisión que están diseñadas para los usos deseados de energía eléctrica.

Los generadores de excitación o síncronos proporcionan mayor potencia y trabajan a un margen más amplio de revoluciones, además necesitan menos mantenimiento.

Estos funcionan siempre en forma muy regular y pueden trabajar tanto en paralelo con la red como alimentar sistemas eólicos autónomos (5).

Los generadores de inducción o asíncronos reciben la corriente de excitación de una fuente exterior que puede ser la red o un generador auxiliar, pero en cualquier caso se trata de una corriente alterna que crea un campo magnético alterno de la misma frecuencia en el inductor.

Por otra parte, la altura óptima de la torre depende del costo de los KW instalados, puesto que un aumento en la altura da como resultado un incremento en el costo de la planta. Los costos son mínimos para las torres más pequeñas y como la energía eólica varía con el diámetro del rotor, éste debe ser lo más grande posible.

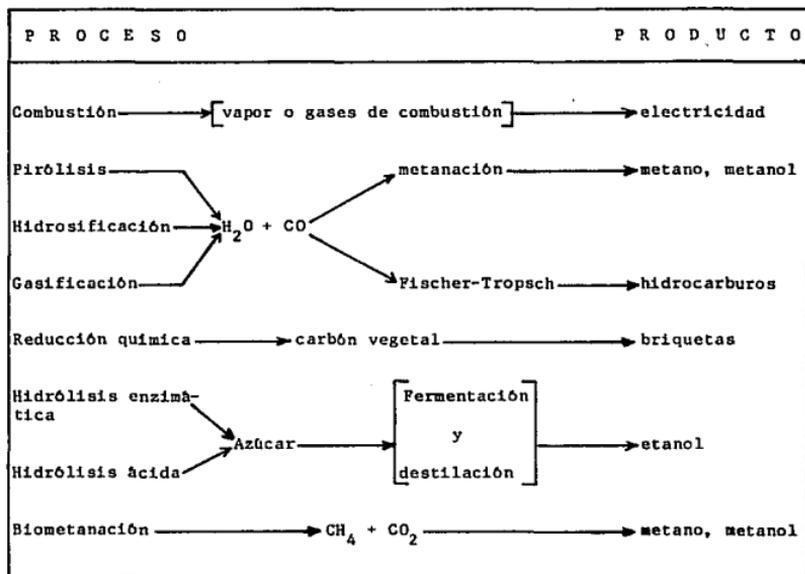
El material usado en la construcción de las torres puede ser madera para las máquinas conversoras de energía eólica pequeñas y acero, que es el material que tiene más uso, para las de tamaño mediano a grande. Se usa también concreto pero son mucho más costosas y resisten menos a las vibraciones, sus ventajas son

de apariencia y un acceso bien protegido para la maquinaria.

En el diseño de cualquier torre, las consideraciones están basadas en el efecto de las fuerzas normales del viento sobre el rotor y la torre, ya que crean momentos torcionales. Las formas van desde postes de madera, tripodes de acero estructural, torres circulares de tabique o concreto y torres tubulares de acero mantenidas verticales mediante guías de alambre de gran resistencia. La elección de cualquiera de estas alternativas es dictada por el peso y tamaño del sistema completo de operación.

2) Energía de Biomasa

Cada uno de los procesos de conversión indicados en el Cuadro No. 2 y que en el Cuadro No. 4 se resumen, representan las formas más convenientes de las aplicaciones de biomasa.



Cuadro No. 4. Procesos para la Conversión de Biomasa en Energía y sus Productos (1).

2.1) Procesos Térmicos

Se conocen cuatro tipos y son los siguientes:

2.1.1) Combustión Directa

Es un proceso probado y en operación comercial en Europa, para producir vapor para la calefacción doméstica o generar electricidad.

Para aprovechar la energía de los desechos sólidos urbanos (basura), mediante la combustión directa, existen básicamente el proceso de incineración el cual nos permite reducir de volumen a los residuos y eliminar las bacterias e insectos en forma rápida por lo que se recomienda este método para los residuos hospitalarios y los provenientes de los rastros.

Dentro de las principales aplicaciones de la combustión directa de madera están la cocción para preparar alimentos y la calefacción (16, 47).

2.1.2) Pirólisis

La pirólisis se emplea para tratar los residuos sólidos, debido a que se pueden recuperar los subproductos que es posible obtener de ellos. La ventaja de la pirólisis es que posibilita el control de los gases emitidos. Este método se ha empleado para producir carbón sintético, para la recuperación de metanol, ácido acético y terpentina de madera. Su proceso requiere el empleo de reactores diseñados especialmente para tratar los residuos.

Se están realizando experimentos en el Laboratorio de Ultrarrefractarios de Odeillo y en Nancy, Francia, por irradiación directa de madera maciza en el foco de hornos solares: las condi-

ciones de pirólisis rápidas no parece que se alcancen, pero el gas producido contiene proporciones de CO y H₂ que son notables para una eventual preparación de metanol de síntesis.

La pirólisis de vegetales y de algas puede preverse a gran escala, del mismo modo que la de numerosos desechos orgánicos de las industrias agroalimentarias y agrícolas (13).

2.1.3) Gasificación

Aquí la biomasa se convierte en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno como principales combustibles.

La materia prima más adecuada para este proceso es aquella que se descompone a la menor temperatura y presión. La mayoría de los materiales biomásicos se han descompuesto a 400 °C que es cuando comienza la descomposición del carbón.

Dentro de los gasificadores fijos se tienen los de corriente paralela o descendente y producen un gas limpio de bajo valor térmico (45-50 MegaJoules/m³) llamado a veces gas productor que puede usarse directamente en los motores de combustión interna, la eficiencia del proceso varía entre 60 y 80% (47).

2.1.4) Licuefacción

Mediante este proceso se puede obtener combustibles líquidos, tales como metanol, etanol o gasolina.

En los años 30's experimentos de laboratorio muestran que el algodón y aserrín pueden ser convertidos a líquidos (aceites sintéticos), si estos son sometidos a temperatura y presión elevadas con agentes reductores, se le ha dado el nombre de licuefacción catalítica (23).

2.2) Procesos Químicos

Pueden emplearse para obtener etanol de carbón hidratados utilizando el proceso Scholler. El tipo de reacción que se lleva a cabo es la llamada hidrólisis ácida (7, 37).

2.3) Procesos Biológicos

Dentro de las aplicaciones son las que se indican a continuación:

2.3.1) Digestión Aeróbica

El empleo de este proceso es como se dijo anteriormente, para el tratamiento de aguas negras, efluentes industriales y elaboración de fertilizantes orgánicos.

2.3.2) Fermentación-Destilación

Se estima que mediante la fermentación se puede producir $1/3 \text{ m}^3$ de metano a partir de 1 kilo de materia orgánica seca. Los ensayos con algas han sido bastante buenos, ya que las algas fermentadas producen un gas que contiene más del 60% de metano y el resto formado por gas carbónico (13).

Cuando la fermentación se hace con cereales, se utilizan los carbohidratos para la producción de etanol y las proteínas se recuperan para aprovecharlas como forraje.

Utilizando la caña de azúcar como materia prima se pueden obtener hasta 60 litros de etanol por tonelada de materia prima. El etanol puede sustituir a la gasolina, debido a que una mezcla del 90% de gasolina y 10% de etanol (gasol), permite operar motores de combustión interna sin modificación, puede usarse también etanol hidratado con menor contenido de alcohol, aquí si se introducen algunas modificaciones al motor sobre todo al carburador.

En Brasil donde se producen anualmente 4000 millones de - litros de etanol, el costo del gasol compite con los precios internacionales de la gasolina

2.3.3) Digestión Anaeróbica (29).

El tratamiento de la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica cumple con tres funciones (1):

- Producir un gas combustible
- Producir mejoradores de suelos, fertilizantes o complementos de alimentos forrajeros
- Reducir la contaminación ambiental producida por la disposición de desechos no tratados.

La energía de 28 m³ de biogas equivale a la de 16.8 m³ de gas natural o a la de 20.8 litros de gasolina, o bien a 18.4 litros de combustible diesel (43).

Una comunidad China (Sichuan), ha incrementado el rendimiento de sus cosechas de hortalizas, utilizando el subproducto de las unidades de biogas como acondicionador y fertilizante.

El éxito de las instalaciones de biogas en lo que respecta a mejorar las condiciones de salubridad, ha quedado documentado en lugares donde se han empleado digestores para tratar residuos humanos y animales. Dos años después de la introducción de los digestores generadores de biogas en cinco comunidades chinas, las investigaciones del Instituto de Sichuan para la Prevención de Enfermedades Parasitarias demostraron que la proporción de individuos infectados con la enfermedad del gusano ganchudo (o nemá todo parásito) se redujo del 64 al 5% (15).

El empleo doméstico principal del biogas que puede obte--

nerse mediante unidades individuales de tamaño familiar (alrededor de 8 m³) o comunitario (alrededor de 40 m³), es el de la cocina y el alumbrado. Se ha calculado que en el caso de una familia de 5 a 6 miembros, un digestor de 8 m³ de biogas puede alimentarse con el estiércol de 4 ó 5 animales domésticos o de corral de mediano tamaño. La adición de excrementos humanos al digestor añadiría aproximadamente 0.025 m³ a la producción de biogas por persona por día.

El metano puede consumirse directamente en lámparas, estufas y refrigeradores de gas o combustible líquido o en motores de combustión interna para generar energía mecánica o eléctrica.

El empleo de biogas para alumbrado requiere de 0.15-0.21 m³/hr., para hervir un galón (3.79 litros) de agua se necesita alrededor de 0.28 m³ y un refrigerador alimentado por biogas consume 0.05-0.063 m³/hr. Estas aplicaciones de uso final del biogas son de especial interés en zonas donde se carece de electricidad.

La Tabla No. 6 muestra el consumo de biogas para diferentes aplicaciones.

EQUIPO	CONSUMO DE BIOGAS (M ³ /HR)
Estufa (2 quemadores)	0.40 - 0.55
Lámpara	0.15 - 0.21
Refrigerador (1.8 ft ³)	0.05 - 0.063
Motor de corriente interna	0.45 - 0.55 por cada H.P.

Tabla No. 6. Consumo de Biogas para Diferentes Aplicaciones (27,31).

C A P I T U L O V I I I

ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

La energía aprovechable a partir de algunas fuentes y la demanda puede no coincidir en cada momento, con sus respectivos valores acumulados a lo largo del tiempo son iguales. En estos casos durante los periodos en que la disponibilidad de energía supera a la demanda, es necesario almacenar el exceso de energía para aprovecharla después (1). Las características variables de la energía solar y eólica obligan a que en muchas de sus aplicaciones sea necesario acoplar sistemas de almacenamiento a los dispositivos de la captación y conversión de energía.

Existen dos formas de almacenamiento de energía; las biológicas y las no-biológicas.

1) Forma Biológica (Fotosíntesis)

La función clorofílica de los vegetales transforma parcialmente la energía solar en una forma de energía química potencial, los alimentos.

La energía absorbida por el organismo vivo depende de su naturaleza, presentándose en forma de energía térmica y principalmente de energía química en las células, por medio de los alimentos.

Las formas vivientes se presentan en dos grupos (13) :

- Los organismos autótrofos
- Los organismos heterótrofos

Los organismos autótrofos (la mayoría de las plantas) son

capaces de producir su propia energía utilizando elementos muy simples de bajo nivel energético (gas carbónico, agua, sales) absorbiendo y fijando la energía solar, mientras que los organismos heterótrofos recurren a la energía de partida ya evolucionada en las formas precedentes por degradación.

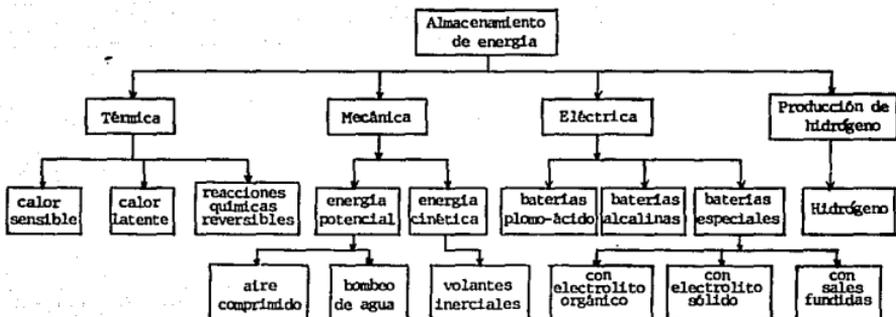
Los organismos autótrofos fabrican de este modo, por fotosíntesis una serie de cuerpos con alto potencial energético, los cuales son el punto de partida de toda la cadena alimenticia.

Gracias a la clorofila los vegetales tienen por si mismos la posibilidad de captar la energía solar, convertirla, almacenarla y realizar a partir de sustancias minerales con bajo potencial energético otras sustancias con alto potencial energético (celulosa, grasas, azúcar), las cuales, por degradaciones sucesivas suministran a los organismos heterótrofos la energía que necesitan - (13) .

Los tejidos clorofílicos reciben la energía luminosa y fijan solo una pequeña parte. Los vegetales crecen rápidamente y la energía solar que absorben y transforman se utilizan para producir los alimentos (directa o indirectamente), de modo natural o aportando elementos sintéticos) e igualmente para obtener energía secundaria (combustión de madera, de resina).

2) Forma No-Biológica

Los sistemas típicos de almacenamiento se muestran en el cuadro No. 5 (1).



Cuadro No. 5. Sistemas de Almacenamiento de Energía (1).

2.1) Almacenamiento Térmico

En la energía solar térmica la acumulación se puede conseguir por medio de reservas de calor, la cual se realiza mediante el calor sensible y latente de diferentes sustancias y materiales o se puede almacenar en reacciones químicas.

2.1.1) Calor sensible

Los medios de almacenamiento de calor sensible suelen ser líquidos (agua) o sólidos (piedra triturada, concreto). Por su bajo costo y simplicidad de diseño los sistemas de almacenamiento en forma de calor sensible son preferidos a los sistemas de calor latente a pesar de su baja densidad de energía (1).

Dentro de los sistemas de almacenamiento de calor sensible

parece ser que el mejor líquido para almacenar este tipo de energía es el agua, por su abundancia, su bajo costo y su alto calor específico. La desventaja es que a temperaturas mayores de 100 °C se evapora requiriendo de recipientes que resistan las presiones que se generan en ello, lo que a su vez encarece los sistemas. Los aceites orgánicos, sales fundidas y metales líquidos no presentan problemas de presión, pero son costosos, de manejo difícil y tienen limitaciones en los intervalos de temperatura en que pueden emplearse. Los medios sólidos para almacenar calor sensible no presentan los problemas del agua y tampoco los de los otros líquidos, pero requieren de mayores cantidades de material y volumen (1).

2.1.2) Calor Latente

Los acumuladores de calor en base a agua, requieren un espacio grande, debido a esto, se está investigando sobre otros medios que tengan una mayor capacidad acumuladora, como son por ejemplo los hidratos de sal que se funden en sus cristales de agua, absorbiendo en ello gran cantidad de energía térmica durante la fusión e hidratación (valores cercanos a 40 - 60 kilocalorías/kilogramo). El decahidrato de sulfato, cuya temperatura de fusión es de 32 °C, acumula, al ser calentado hasta 50 °C, seis veces más calor que el mismo volumen de agua y once veces más que un acumulador térmico de piedra (6).

Los acumuladores de calor latentes, permiten utilizar el calor latente de la fusión, hidratación y cristalización. El calor latente es la energía que se precisa para "transformar internamente" un material a temperatura constante, por ejemplo, para --

transformar un material de su estado sólido al líquido (6). El su ministro y la cesión de nuevo calor, se realiza a la temperatura crítica (entre 29 - 52 °C en los hidratos de sal).

El almacenamiento por calor sensible o latente a baja temperatura utiliza materiales corrientes y poco costosos. Pero cuando se superan los 100 °C es necesario recurrir a líquidos orgánicos especiales como el óxido de difenilo (hasta 300 °C), o a compuestos minerales fundidos (hasta 600 °C) (22) .

2.1.3) Reacciones Químicas

En el almacenamiento químico interviene una reacción endotérmica reversible, la cual puede invertirse cuando se requiere liberación de calor. Para que una reacción sea utilizable en el almacenamiento de energía solar se requiere que:

- La reacción sea reversible;
- Los reactivos puedan hacer uso de la energía del espectro solar, tanto como sea posible;
- La energía almacenada en la reacción sea bastante grande (del orden de 60 watts hora/kilogramo);
- Los reactivos sean económicos

Por otra parte, no se requiere que la reacción sea reversible si los productos pueden separarse y almacenarse como un combustible, un ejemplo típico es la producción de hidrógeno (25) .

Las reacciones químicas reversibles también pueden servir para construir "bombas de calor". Son sistemas de tres temperaturas: una fuente caliente (colector solar), una fuente fría (atmósfera) y una utilización (habitación). En esta ocasión se utilizan dos reacciones químicas reversibles que absorben calor en un sent

do y lo liberan en otro, utilizando un producto común, generalmente un gas. Gracias a este dispositivo, el calor tomado de la fuente caliente se añade a la fuente fría para proporcionar a la utilización más energía de la que se ha consumido en la fuente caliente (22).

2.2) Almacenamiento Mecánico

2.2.1) Energía Potencial

2.2.1.1) Aire Comprimido

Esta forma consiste en acumular aire comprimido en depósitos o cavernas adaptadas previamente, para recuperarlo después a través de una turbina en forma de energía eléctrica (5, 13).

Generalmente se calienta el aire antes de dejarlo expandir con lo que se mejora el rendimiento del proceso. Si se reducen las fugas al mínimo, el rendimiento teórico de este sistema es del orden del 70 a 75% y el tamaño óptimo de la instalación 200 - 1,000 Megawatts hora.

El sistema puede mejorarse disminuyendo la aportación de calor durante el proceso de calentamiento, bien aprovechando el calor producido en la compresión, o utilizando calor geotérmico o algún tipo de energía residual.

En Alemania Federal existe una instalación de este tipo en Huntorf. El aire se comprime a 700 atmósferas y se almacena en dos cuevas abiertas en una montaña de sal con una capacidad de 300,000 m³. La planta permite recuperar en dos horas la energía acumulada, con un aporte de 0.8 kilowatts hora empleado en la compresión y 1.5 kilowatts hora en el calentamiento por cada kilowatt hora obtenido (13, 43).

2.2.1.2) Bombeo de agua

Cuando el convertidor solar proporcione trabajo mecánico, uno de los métodos de almacenamiento es utilizar este trabajo para impulsar bombas que hagan subir cierta cantidad de agua a un depósito elevado. A medida que se vaya necesitando se puede ir extrayendo el agua para emplearse en sistemas de riego o para mover turbinas donde la energía se pueda recuperar de nuevo en forma de trabajo.

El rendimiento de este tipo de almacenamiento es del orden del 70 - 75% y el tamaño óptimo, desde el punto de vista económico está comprendido entre los 200 y los 2,000 Megawatts-hora, adecuada para la instalación de parques de aeroturbinas (5).

2.2.2) Energía Cinética

2.2.2.1) Volantes Inerciales

Consiste en acelerar un sistema inercial en forma de volante, haciéndolo girar sobre un eje apoyado sobre cojinetes y perfectamente lubricado, de tal manera que sus pérdidas por rozamiento sean mínimas. El sistema se completa con un alternador o una bomba que se conecta cuando se necesite recuperar la energía a costa de frenar el volante (5).

Por ejemplo un turbo-alternador girando a 3,000 revoluciones por minuto (rpm) y produciendo 700 Megawatts, almacena una energía de 300 kilowatts hora y puede suministrar por ejemplo, 10 Megawatts en 2 minutos ó 700 Megawatts durante 2 segundos (13).

Los volantes más eficaces serán los construidos con materiales que presenten una buena resistencia mecánica y poco peso y en este sentido los modernos materiales plásticos pueden ser la

solución adecuada.

Los rendimientos de los volantes de inercia son el orden del 70 - 85%, y en un futuro próximo podrán ser de interés práctico en instalaciones de 10 - 15 kilowatts hora de capacidad (5, 13)

2.3) Almacenamiento Eléctrico

El acumulador electroquímico permite realizar la reversibilidad de las pilas, es decir la conversión:

Energía química \longleftrightarrow Energía eléctrica

De esta forma permite almacenar la energía eléctrica en forma química.

Los acumuladores presentan un interés en los estudios actuales de almacenamiento de energía eléctrica en la gama de potencias medias y periodos de almacenamiento limitados. Ofrece las siguientes ventajas (13):

- de existir industrialmente,
- de ser perfectamente modulares,
- de entrar inmediatamente en acción.

2.3.1) Baterías Alcalinas

Se les denomina así debido a que la composición de su electrolito es una solución de potasa cáustica al 25% de concentración. La materia activa positiva es el óxido de níquel al que se añaden granos de níquel o grafito, la materia negativa es hierro reducido o mejor una mezcla de hierro y cadmio (13).

El electrolito no interviene en la reacción, su densidad

y composición permanecen constantes.

Las baterías alcalinas a base de níquel-hierro o níquel-cadmio tienen mejores características en lo que se refiere a los ciclos de carga, y por ello, aunque son más caras, son más adecuadas para el almacenamiento de la energía de origen eólico. La vida de estas baterías es de 10 años soportando ciclos completos de carga-descarga, mientras que en las de plomo-ácido es de 5 - 6 años.

Las baterías alcalinas se comportan mal a baja temperatura y su rendimiento es de 55 - 65%, inferior al de los acumuladores de plomo-ácido.

2.3.2) Baterías Especiales

Este tipo, en general tienen mayores densidades de acumulación que las de plomo-ácido o las alcalinas, y son las siguientes (5, 13).

- Con electrolitos orgánicos. El dominio de estabilidad de ciertos disolventes orgánicos es mayor que el del agua y permite la utilización de metales alcalinos con electrodo negativo.
- Con electrolitos sólidos. La transferencia de las cargas se realiza por los iones positivos o negativos; a estos electrolitos se les llama en ocasiones superconductores iónicos.
- Con sales fundidas. El electrolito es una mezcla que contiene sales alcalinas, utilizable entre 150 y 320 °C. Por ejemplo la batería de sodio-azufre tiene una densidad de acumulación de 10 veces las baterías convencional

les, pero su desventaja es que trabajan a temperaturas de 500 °C.

2.4) Producción y Almacenamiento de Hidrógeno

El hidrógeno obtenido a partir de la energía solar será probablemente un combustible importante en el futuro. El hidrógeno se puede producir mediante la electrólisis del agua utilizando la electricidad generada en celdas fotovoltaicas, convertidores termoelectrónicos o termoiónicos, o dinamos accionados por máquinas térmicas (9).

El almacenamiento de hidrógeno se puede hacer en forma gaseosa o de hidruros, utilizándose después mediante quemadores o - baterías de gas. Su funcionamiento electroquímico permite alcanzar rendimientos del 80%, sin las limitaciones que impone el Ciclo de Carnot a las máquinas de combustión interna (5).

El almacenamiento de hidrógeno gaseoso se puede hacer en capas acuíferas, en cavidad salina y cavidades artificiales, los cuales están previstos para grandes capacidades y almacenamientos prolongados.

El almacenamiento de hidrógeno líquido es actualmente muy caro y peligroso, pero en forma de hidruros reversibles sería una solución satisfactoria para almacenar pequeñas cantidades de hidrógeno en forma fácil.

Finalmente se debe admitir que el rendimiento del almacenamiento de energía alcanza con dificultad el 40% y es difícil - que supere el 50% en un futuro (13).

C A P I T U L O I X

EJEMPLOS DE DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS (SOLAR, EOLICO Y BIOMASICO)

A continuación se presentan los procedimientos básicos - para dimensionar sistemas fotovoltaicos, eólicos y biomásicos (digestores anaeróbicos), así como los costos de inversión de cada - uno de ellos, a manera de ejemplos prácticos de aplicabilidad -- real y como una opción para abastecer de electricidad para iluminación y combustible para cocinar, siendo estas aplicaciones las más esenciales en nuestras comunidades rurales alejadas de la red eléctrica y de difícil acceso.

Objetivo

Dimensionar un sistema fotovoltaico y otro eólico que permita abastecer de electricidad a una comunidad rural, la cual contará con iluminación y entretenimiento. Para cocinar se empleará el combustible que se obtendrá de un digestor anaeróbico. La comunidad rural se localiza en la región de Salina Cruz Oaxaca; cuenta con 16 casas-habitación, escuela primaria, dispensario médico, casa del pueblo, tienda rural, iglesia y alumbrado público.

Necesidades

Casa-habitación

Cuenta con dos cuartos y una cocina a los cuales se les - pretende instalar a cada uno de ellos una lámpara de 11 watts, el consumo de electricidad al día es el siguiente: al primer cuarto se le dará iluminación 4 horas, al segundo 2 horas y a la cocina también 2 horas.

El radio es el aparato electrodoméstico más popular, por lo que el consumo de pilas traídas de la capital es alto, por lo que cada casa-habitación tendrá además un contacto eléctrico de corriente directa para un radio-tocacintas de potencia no mayor a 15 watts, se pretende dar un máximo de entretenimiento por lo que éste aparato podrá mantenerse encendido seis horas al día.

Para la cocción de alimentos, cada casa-habitación requiere gas combustible para cocinar durante 5 horas diarias, el cual se obtendrá de un digestor anaerobico.

Escuela Primaria

Este edificio será dotado con 5 lámparas de 11 watts cada una, con el propósito de facilitar el aprovechamiento del aula por las tardes o noches para impartir educación a adultos. Las cinco lámparas darán servicio durante 2 horas al día después de la puesta del sol. El aula contará con un contacto eléctrico de corriente directa para un equipo de sonido de potencia máxima de 50 watts que funcionará hasta por media hora al día.

Dispensario Médico

El uso que se le dará a este local será para llevar a cabo primeros auxilios, será habilitado con 4 lámparas de 11 watts las cuales se podrán emplear durante 4 horas diarias, excepto en casos de urgencia extrema. En caso de urgencia extrema el uso de aparatos médicos podría llegar a agotar la carga de la batería. En tales circunstancias será necesario recurrir al uso de otras baterías de los sistemas domiciliarios o de los edificios comunitarios. Estas baterías deberán ser transportadas al dispensario-

-y conectadas en paralelo a la batería original mientras dure la emergencia.

Casa del Pueblo

Los servicios eléctricos en este edificio son el alumbrado del salón principal, con 5 lámparas de 11 watts con un patrón diario de 3 horas de uso; y una lámpara de 11 watts en la bodega que tiene uso intermitente de una hora diaria. Además, el sistema dará electricidad a un equipo de sonido de potencia máxima de 50-watts durante 3 horas al día.

Tienda Rural

Este edificio tendrá 4 lámparas de 11 watts, dos de ellas con un régimen de operación de 3 horas diarias durante 7 días de la semana, y las otras dos (en la bodega) con un régimen que no - deberá exceder los 30 minutos al día. Además se podrá operar un pequeño radio de potencia máxima de 15 watts hasta por 8 horas al día todos los días de la semana.

Iglesia

La iglesia contará con un total de 13 lámparas de 11 -- watts, sólo 2 lámparas serán utilizadas por un período de 2 horas diarias los 7 días de la semana. Para las ceremonias religiosas - oficiadas que se lleven a cabo cada fin de semana se podrán mantener encendidas todas las luces por un período de 3.5 horas.

Además el sistema energizará un pequeño equipo de sonido de potencia máxima de 50 watts durante un período no mayor de - una hora diaria los 7 días de la semana.

Alumbrado Público

Habrá 12 luminarias para alumbrado público; 4 en el jardín, habrá una luminaria frente al dispensario médico, área de juegos infantiles, casa del pueblo e iglesia, por último 4 luminarias en el área deportiva. Todas las luminarias funcionarán durante 5 horas diarias en el momento en que se oculte el sol. Cada luminaria constará de 2 lámparas de 11 watts.

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO
(ENERGIA SOLAR)

Con la información necesaria ya recopilada, se pueden utilizar diversos programas de simulación numérica como herramientas de diseño; ya que se puede estudiar la operación de cualquier sistema, determinar su costo de inversión y aún optimizar algunos de sus parámetros. El procedimiento de dimensionamiento que a continuación se describe fué desarrollado por la empresa denominada Nacional de Conductores Eléctricos, S.A. de C.V., Area de Energía Solar (34).

1) Datos que se requieren:

- Localización geográfica
- Insolación de la localidad
- Consumo de energía

2) Lo que permite calcular:

- Número y conexión de módulos. Inclinación
- Número y conexión de baterías. Autonomía
- Características del control de carga.

3) El sistema se calcula con la insolación del mes más desfavorable una vez que la inclinación ha sido seleccionada. Esto asegura que siempre disponga de suficiente energía. La figura No. 1 muestra el número de horas-pico para las diferentes zonas del país y la inclinación.

4) Autonomía: Número de días que el banco de baterías puede alimentar los equipos con seguridad, en caso de que la energía entregada por los módulos fuera nula.

5) Cálculo de(1) (los) módulo(s) necesario(s):

- a) Determine el número de ampers-hora que demanda el equipo alimentado, N_c .
- b) Utilizando las curvas I-V del fabricante determine la corriente I_m (corriente de operación en ampers) que entrega el módulo caliente, al voltaje de operación.
- c) De la figura No. 1, determine el mínimo mensual de horas-pico de insolación (H_p) y la inclinación óptima.
- d) Multiplicando $I_m \times H_p$ se obtiene el número de ampers-hora (N_s) que genera el módulo en el mes más desfavorable del año.
- e) Dividiendo el número de ampers-hora consumido entre el número de ampers-hora generados por el módulo, se obtiene el número de módulos necesarios para alimentar el equipo.
- f) Si se tiene incertidumbre en los datos de insolación incremente el número de módulos 20%, multiplicando por 1.2 el valor anterior que se considera como un factor de seguridad.

6) Cálculo de las baterías necesarias

- a) Determine la autonomía requerida (A_u). Es suficiente entre 4 y 8 días. Es importante notar que aún en días nublados se tiene 20 a 30% de la insolación mínima mensual, por lo que la autonomía en días nublados es mayor. Por otro lado al usar la insolación mínima mensual se ha tomado en cuenta que es un mes nublado.

- b) La capacidad útil requerida (Cu) resulta de multiplicar el consumo diario Nc por la autonomía Au.

$$Cu = Nc \times Au \quad (\text{Ampers-hora})$$

- c) La capacidad nominal, que es la dada por el fabricante de las baterías es mayor que la capacidad útil ya que - en general no se permite que se descargue totalmente.

$$Cn = \frac{Cu}{Fu}$$

donde Fu = Factor de utilización de capacidad nominal - y su valor es de 0.8 .

- d) Especificaciones del controlador de carga:

- Voltaje de operación
- Corriente del arreglo fotovoltaico
- Corriente a los equipos
- Tipo de baterías

A continuación se presenta el caso concreto, para fijar - los conceptos antes descritos. Se considera un sistema autónomo (sin interacción con red). Se hará según la secuencia descrita anteriormente.

Lista y Características del Equipo Empleado

Edificio o Lugar	Cantidad	Aparato	Características	Tiempo de Uso (hr/día)
Vivienda	1	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	4
	1	"	"	2
	1	"	"	2
	1	Radio	15 watts, 1.25 amper	6
Escuela	5	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	2
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	1
Dispensario	4	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	4
Casa del - Pueblo	5	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	3
	1	"	"	1
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	3
Tienda Rural	2	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	3
	2	"	"	1
	1	Radio	15 watts, 1.25 amper	8
Iglesia	2	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	2
	13	"	"	0.5
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	1
Alumbrado Público	24	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	5

Con la finalidad de mostrar el procedimiento, sólo para la casa-habitación se efectuará el cálculo respectivo y para los demás sitios se anotará únicamente el resultado.

1.-Demanda diaria del equipo en amper-hora, Nc.

Casa-habitación

1 Lámpara	x 0.9 amper	x 4 horas	= 3.6 amper-hora
1 "	x "	x 2 "	= 1.8 "
1 "	x "	x 2 "	= 1.8 "
1 Radio	x 1.25 amper	x 6 "	= 7.5 "
			Nc = 14.7 amper-hora

Edificio o Lugar	Demanda Diaria, Nc (amper-hora)
Escuela	13.17
Dispensario Médico	14.4
Casa del Pueblo	26.91
Tienda Rural	17.2
Iglesia	10.63
Alumbrado Público	108.0
TOTAL	190.31

Si sumamos las demandas diarias de la casa-habitación, - 14.7 amper-hora y demás edificios o lugares 190.31 amper-hora, - obtenemos un total de 205.01 amper-hora diarios; por lo tanto, el total de la demanda diaria del equipo para la comunidad incluyendo 16 casas-habitación es de 425.51 amper-hora.

2.- Corriente de Operación

Se selecciona un módulo solar M75 marca Siemens con la --
curva I-V mostrada en la figura No.11, en la cual se tiene --
que a 14 volts de operación, con el módulo caliente (47 °C) la
corriente de operación es: $I_m = 3.0$ amper

3.- De acuerdo a la figura No.1, el número de horas-pico de inso-
lación diaria para la región de Salina Cruz Oaxaca es:

$$H_p = 4.3 \text{ horas-pico}$$

4.- El número de amper-hora diarios generados por módulo es:

$$N_s = I_m \times H_p = 3.0 \text{ amper} \times 4.3 \text{ horas-pico} = 12.9 \text{ amper-hora}$$

5.- El número de módulos solares necesarios para cada lugar es:

Casa-habitación

$$N = \frac{N_c}{N_s} = \frac{14.7 \text{ amper-hora}}{12.9 \text{ amper-hora}} = 1.14 \text{ módulos}$$

Edificio o Lugar	Número de Módulos Solares M75
Escuela	1.02
Dispensario Médico	1.12
Casa del Pueblo	2.09
Tienda Rural	1.33
Iglesia	0.82
Alumbrado Público (cada luminaria)	0.70

6.- Sobredimensionamiento para dar un margen de seguridad.

Casa-habitación

$$N = 1.14 \times 1.2 = 1.37 \text{ módulos} \Rightarrow 2 \text{ módulos M75}$$

Edificio o Lugar	Número de Módulos Solares M75
Escuela	1
Dispensario Médico	2
Casa del Pueblo	3
Tienda Rural	2
Iglesia	1
Alumbrado Público (cada luminaria)	1

7.- Autonomía Sugerida de 5 días: Au = 5 días

8.- Capacidad Util: Cu .

Casa-habitación

$$Cu = Nc \times Au = 14.7 \text{ amper-hora} \times 5 \text{ días} = 73.5 \text{ amper-hora}$$

Edificio o Lugar	Capacidad Util, Cu (amper-hora)
Escuela	65.85
Dispensario Médico	72.0
Casa del Pueblo	134.55
Tienda Rural	86.0
Iglesia	53.15
Alumbrado Público (cada luminaria)	45.0

9.- Capacidad Nominal de las baterías, Cn .

Se sugiere utilizar baterías plomo-ácido por su costo moderado y disponibilidad nacional. Se empleará el factor de utilización, $F_u = 0.80$, de capacidad nominal, debido a que se considera que las baterías se descargan 20% de la capacidad de almacenamiento.

Casa-habitación

$$C_n = \frac{C_u}{F_u} = \frac{73.5 \text{ amper-hora}}{0.80} = 91.87 \text{ amper-hora a 12 volts}$$

Edificio o Lugar	Capacidad Nominal (amper-hora)
Escuela	82.31
Dispensario Médico	90.0
Casa del Pueblo	168.2
Tienda Rural	107.5
Iglesia	66.4
Alumbrado Público (cada luminaria)	56.2

10.- Número de Baterías, Nb .

En este caso los fabricantes de baterías ofrecen valores de capacidad con diferencias grandes entre sí, por ejemplo: 90, 100, 120 amper-hora, ..., entonces, habrá que elegir la capacidad más próxima a la deseada.

Casa-habitación

Para éste caso seleccionamos baterías plomo-ácido de 100 - amper-hora de capacidad de acuerdo a especificaciones del fabricante.

$$N_b = \frac{91.87 \text{ amper-hora}}{100 \text{ amper-hora}} = 0.92 \text{ baterías} \Rightarrow 1 \text{ batería}$$

Edificio o Lugar	Baterías	
	Capacidad amper-hora	Cantidad
Escuela	90	1
Dispensario Médico	90	1
Casa del Pueblo	90	2
Tienda Rural	120	1
Iglesia	90	1
Alumbrado Público (cada luminaria)	90	1

11.- Control de Carga necesario por el tipo de módulo solar empleado.

Para cada edificio o lugar es necesario colocar un controlador de carga, el cual tiene las siguientes funciones:

- Evitar que la batería se llegue a sobrecargar
- Evitar que la batería baje de un voltaje mínimo (descarga profunda).
- A menudo incluye un diodo de bloqueo en serie entre módulos y baterías, para evitar que estas se descarguen por la noche.

-En caso de no tener el módulo el diodo de bloqueo, el controlador de carga debe incluir una pieza de éstas y la función es evitar la corriente en sentido inverso (batería a módulo).

12.- Características Físicas de cada Módulo Solar

-No. de celdas en serie : 33
-Tamaño de celda : 102.9 mm x 102.9 mm
-Longitud del módulo : 121.9 cm
-Ancho : 33.0 cm
-Espesor : 3.6 cm
-Peso : 5.2 Kg

13.- Especificaciones Eléctricas de cada Módulo Solar

-Modelo : M75 Siemens
-Potencia : 47 watts-pico
-Corriente : 2.94 amper
-Voltaje : 16.0 volts
-Corriente de corto circuito : 3.27 amper
-Voltaje de circuito abierto : 19.9 volts

La orientación del arreglo fotovoltaico lo proporciona el mapa de la figura No.1, el cual indica que para la región de Salina Cruz Oaxaca; los módulos se deben inclinar respecto a la horizontal a un ángulo de 20° orientados hacia el Ecuador.

14.- Mantenimiento

- Limpie la cubierta de los módulos con un trapo seco, en caso necesario utilice una fibra plástica para limpiar -residuos adheridos.
- El controlador debe de contar con un fusible de protección, para aislar un posible corto circuito en el sistema.
- La comunidad debe de contar con los conocimientos elementales de operación y mantenimiento de los sistemas.
- El nivel del electrolito debe estar por encima de las --placas de la batería.
- En las regiones rurales puede usarse agua de lluvia como agua de reposición.

TABLA DE RESULTADOS

Edificio o Lugar	Cargas Consideradas						Módulos		Baterías		Controlador			
	Lámparas		Radio		Equipo de Sonido		Canti- dad	Poten- cia (watts)	Canti- dad	Capa- cidad amp-hr	Canti- dad	Capacidad		
	Canti- dad	Poten- cia(W)	Canti- dad	Poten- cia(W)	Canti- dad	Poten- cia(W)						Volts	ampers de módulos	ampers a la Carga
VIVIENDA	4	11	1	15			2	47	1	100	1	12	6	4
ESCUELA	5	11			1	50	1	47	1	90	1	12	3	8.7
DISPENSARIO	4	11					2	47	1	90	1	12	6	3.6
CASA DEL - PUEBLO	6	11			1	50	3	47	2	90	1	12	9	9.6
TIENDA RURAL	4	11	1	15			2	47	1	120	1	12	6	4.9
IGLESIA	13	11			1	50	1	47	1	90	1	12	3	17.7
ALUMBRADO PUBLICO	24	11					12	47	12	90	12	12	36	21.6

COSTO DE INVERSION DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los componentes del sistema fotovoltaico pueden adquirirse en México por medio de casas distribuidoras, los precios que a continuación se enlistan fueron proporcionados por "ELECTRO -- ELECTRONICA INDUSTRIAL" en el mes de Enero de 1993, excepto el precio de las baterías.

CONCEPTO	PRECIO UNITARIO (N\$)
Módulo Solar M75	1,527.00
Lámpara (11 W)	99.00
Controlador	279.00
Batería (90 Amp-h)	115.00
Batería (100 Amp-h)	130.00
Batería (120 Amp-h)	156.00

El costo de inversión del sistema fotovoltaico con los requerimientos de electricidad para una casa-habitación de acuerdo a nuestro ejemplo práctico es el siguiente:

CONCEPTO	PIEZAS NECESARIAS	PRECIO UNITARIO (N\$)	PRECIO TOTAL (N\$)
Módulo Solar M75	2	1,527.00	3,054.00
Lámpara (11 W)	4	99.00	396.00
Controlador	1	279.00	279.00
Batería (100 Amp-h)	1	130.00	130.00
Total = N\$ 3,859.00			

Para las 16 casas-habitación de que consta la comunidad rural, el costo será de N\$ 61,744.00 .

El costo para los demás edificios o lugares son los siguientes:

EDIFICIO O LUGAR	COSTO (N\$)
Escuela	2,416.00
Dispensario	3,844.00
Casa del Pueblo	5,684.00
Tienda Rural	3,885.00
Iglesia	3,208.00
Alumbrado Público	25,428.00
Total = N\$ 44,465.00	

Por lo tanto, el costo total de inversión del sistema fotovoltaico para la comunidad rural es de N\$ 106,209.00

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA EOLICO
(ENERGIA DEL VIENTO)

El procedimiento de dimensionamiento que a continuación se describe se basa en lo desarrollado en la referencia No.8 - cuyo título es "Aeromotores y Aerogeneradores" por Guy Cunty.

Lista y Características del Equipo Empleado

Edificio o Lugar	Cantidad	Aparato	Características	Tiempo de Uso (hr/día)
Vivienda	1	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	4
	1	"	"	2
	1	"	"	2
	1	Radio	15 watts, 1.25 amper	6
Escuela	5	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	2
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	1
Dispensario	4	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	4
Casa del Pueblo	5	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	3
	1	"	"	1
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	3
Tienda Rural	2	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	3
	2	"	"	1
	1	Radio	15 watts, 1.25 amper	8
	2	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	2
	13	"	"	0.5
	1	Sonido	50 watts, 4.17 amper	1
Alumbrado Público	24	Lámpara	11 watts, 0.9 amper	5

Al igual que en el caso del sistema fotovoltaico, sólo - para la casa-habitación se efectuará el cálculo respectivo y para los demás sitios se anotará únicamente el resultado.

1.-Demanda diaria del equipo en watt-hora:

Casa-habitación

1 Lámpara x 11 watts x 4 horas = 44 watt-hora
 1 " x " x 2 " = 22 "
 1 " x " x 2 " = 22 "
 1 Radio x 15 " x 6 " = 90 "

Total = 178 watt-hora

La demanda diaria del equipo para los demás sitios es:

Edificio o Lugar	Demanda Diaria (watt-hora)
Escuela	160
Dispensario Médico	176
Casa del Pueblo	326
Tienda Rural	208
Iglesia	165.5
Alumbrado Público	1320
TOTAL	2,355.5 w-h

Sumando la demanda diaria de energía de la casa-habitación, 178 watt-hora; y la demanda de los demás edificios o lugares, 2,355.5 watt-hora; obtenemos un total de energía requerida al día de 2,533.5 watt-hora. Por lo tanto, para 16 casas-habitación y demás edificios o lugares se necesitan 5,203.5 watt-hora diarios.

Desgraciadamente no se encuentra en el mercado un aerogenerador que proporcione exactamente nuestras necesidades diarias de energía eléctrica, por lo que se debe de escoger al más próximo.

Se analizaron las curvas de rendimiento de diferentes aerogeneradores comerciales, proporcionadas por los fabricantes de los mismos para determinar la energía diaria y anual que se puede esperar de estos aerogeneradores en la región de Salina Cruz Oaxaca; de acuerdo a la tabla No.1 la velocidad media anual para ésta región es de 5 m/seg.

Aerogenerador	Potencia Nominal (Kw)	Energía Diaria Esperada (Kw-h/día)	Energía Anual Esperada (Kw-h)
Bergey Windpower	1.5	5.5	2,000
Colibrí	6.0	29.3	10,700
Bergey Windpower	10.0	41.0	15,000

En base a los datos anteriores, el sistema que conviene seleccionar es el Bergey Windpower de potencia nominal de 1.5 Kw, ya que según datos del fabricante (Bergey Windpower Co., Inc.), éste aerogenerador produce aproximadamente 5-6 Kw-h por día de electricidad, con la cual cubrimos perfectamente nuestras necesidades diarias de energía eléctrica (5,203.5 w-h ó 5.2 Kw-h).

En la figura siguiente se muestra la curva de rendimiento del aerogenerador seleccionado.

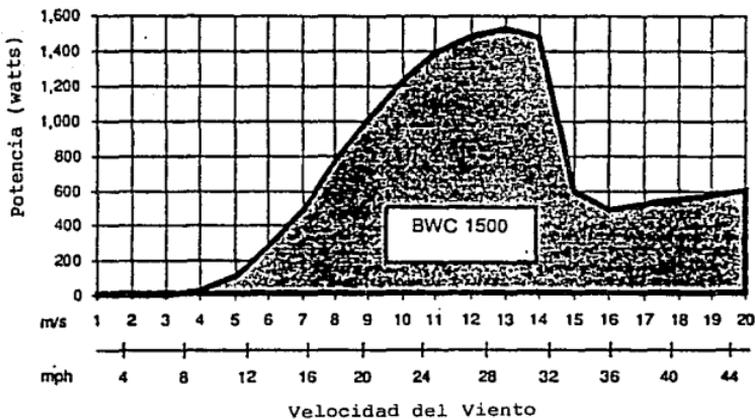


Figura No. 29. Curva de Rendimiento del Aerogenerador Bergey - Windpower 1500.

Especificaciones del aerogenerador Bergey Windpower, 1.5 Kw

a) Características Generales del Sistema

- Marca : Bergey Windpower
- Fabricante : Bergey Windpower Co., Inc.
- País de Origen : USA (Oklahoma)
- Tipo de Eje : Horizontal
- Altura de la Torre : 60 ft (18 m)

b) Especificaciones Mecánicas

- Tipo : 3 palas contra el viento
- Diámetro del Rotor : 3.05 m (10 ft)
- Peso : 76 Kg (168 lbs.)
- Protección de Velocidad Excesiva : Autoplegable
- Rango de Temperatura : -40 a 60 °C
- Dimensiones de Envío : 1 caja de cartón
(150x50x60 cm)

c) Especificaciones Eléctricas

- Electrónica Exterior : 3 fases AC (frecuencia regulable)
- Generador : Alternador Magnético Permanente

d) Funcionamiento

- Velocidad de Viento de Arranque : 3.6 m/seg. (8 mph)
- Velocidad de Diseño : 54 m/seg. (121 mph)
- Relación de Velocidad de Viento : 12.5 m/seg. (28 mph)
- Relación de Potencia : 1500 watts
- Velocidad del Rotor : 100-500 rpm

Un esquema del aerogenerador Bergey Windpower se muestra en la siguiente figura:

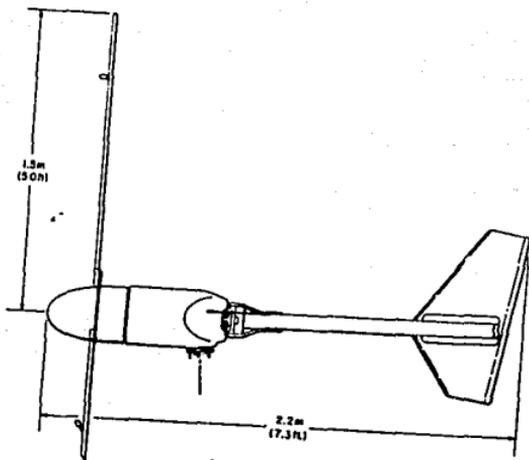


Figura No. 30. Aerogenerador Bergey Windpower 1500.

COSTO DE INVERSION DEL SISTEMA EOLICO

El sistema eólico seleccionado se puede adquirir en el -- mercado por medio de paquete, el cual incluye todos los componentes necesarios para su instalación. El costo estimado por la empresa Bergey Windpower Co.,Inc. en el mes de diciembre de 1992 es el siguiente:

CANTIDAD	CONCEPTO	PRECIO (dólares)
1	Aerogenerador BWC 1.5 Kw, 24 VDC	2,895.00
1	Sistema de Control BWC VCS-1.5/24	760.00
1	Torre Tipo Rohn 25G de 60 ft.(18m)	1,578.00
1	Fusible de Seguridad Westinghouse - RGFN421N 30A.	141.00
1	Fuente Central Photron PP-100-SCF - DC, 100A.	299.00
4	Baterias Surrete CH-375, 6 VDC. - 335 Amp-hr,(350.00 dólares cada una)	1,400.00
1	Inversor de Voltaje 2.5 Kw, 120 VAC 60 Hz.	1,338.00
Total = dólares 8,411.00		

Además, el costo por cada kilómetro de red de distribución es de 9,950.00 dólares.

Por lo tanto, el costo total de inversión del sistema eólico para la comunidad rural es de 18,361.00 dólares, que equivalen a N\$ 56,001.05 (Julio de 1993).

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA BIOMASICO
(ENERGIA DE BIOMASA)

Se requiere suficiente cantidad de biogas para cocinar durante cinco horas diarias en una estufa de dos quemadores.

En base al método desarrollado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas Departamento de Fuentes No-Convencionales, referencia No.27, los datos que se necesitan son los siguientes:

-Requerimientos de biogas por día: B (m³ biogas/día)

-Relación del volumen de biogas producido al día por volumen de digestor:

$$R \left(\frac{\text{m}^3 \text{ biogas/día}}{\text{m}^3 \text{ digestor}} \right)$$

Se tiene entonces que el volumen del digestor (V) en metros cúbicos, estará dado por la relación:

$$V = \frac{B}{R}$$

Para calcular el digestor requerido, se procede de la siguiente manera:

- 1) De acuerdo a las tablas No.3 y 6, y tomando como promedio de consumo 0.475 m³/hora, se necesitarán 2.375 m³/día de biogas, para lo que se requieren 40 Kg de estiércol fresco de vaca. Se estima que ésta cantidad de residuo se puede recolectar de 4 vacas no estabuladas.
- 2) Un digestor tipo hindú operado con desechos de vaca mezclados con agua caliente, a 25 días de residencia presenta una --

relación de volumen de biogas producido al día por volumen de digester del orden de 0.75, es decir, $R=0.75$.

3) El volumen del digester, será entonces:

$$V = \frac{2.375 \text{ m}^3/\text{día}}{0.75 \frac{\text{m}^3 \text{ biogas/día}}{\text{m}^3 \text{ digester}}} = 3.17 \text{ m}^3$$

Con objeto de asegurar que se cuenta con suficiente biogas, pasamos al orden inmediato superior, lo que nos da un volumen de digester de 4 m^3 , lo que producirá del orden de 3 m^3 de biogas al día.

Para poder suministrar esta cantidad de biogas se requiere de 50 Kg de estiércol fresco de vaca al día, por lo que se necesitarán 5 vacas no estabuladas.

Se propone un digester cilindrico tipo hindú debido a que su carga y operación son sencillos. Este digester se construirá enterrado con objeto de proporcionarle aislamiento térmico. Se carga por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación y produce una cantidad diaria de biogas más o menos constante si se mantienen las condiciones de operación.

En un sistema de carga diaria como el que se pretende -- construir, el tiempo de retención, va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digester, ya - que se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\text{volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{tiempo de retención (días)}} = \text{volumen de carga diaria (m}^3\text{/día)}$$

Es decir, que para un tiempo de retención de 25 días, cada día se carga 1/25 del volumen total del digestor, y en promedio la materia orgánica y la masa microbiana permanecen 25 días dentro del sistema. La cantidad de biogas producido por una planta dependerá entre otras cosas de la cantidad de desecho alimentado diariamente.

Por lo tanto, la carga de alimentación diaria será:

$$\frac{4 \text{ m}^3}{25 \text{ días}} = 0.16 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad \text{ó} \quad 160 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} ; \text{ asumiendo la densidad de la mezcla de } 1000 \text{ Kg/m}^3$$

Es decir, se debe alimentar al digestor diariamente 50 Kg de estiércol fresco de vaca y 110 litros de agua.

- 4) Si se trata de un digestor cilíndrico vertical de diámetro (d) igual a la profundidad (h); d = h, el volumen del cilindro será:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times h = \frac{\pi d^3}{4} = 4 \text{ m}^3$$

y por lo tanto el diámetro es:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \times 4}{\pi}} = 1.72 \text{ m}$$

- 5) La relación de altura a diámetro del pozo no necesariamente es de 1 a 1. Veamos el cálculo de la profundidad del pozo para este mismo digestor de 4 m^3 de volumen si estipulamos un diámetro de 1.60 m.

$$V = \frac{\pi \times (1.60)^2}{4} \times h = 4 \text{ m}^3$$

$$h = \frac{4 \times 4}{(1.60)^2 \times \pi} = \frac{4 \times 4}{2.56 \times \pi} = 1.99 \text{ m}$$

tenemos ahora un pozo de 1.60 m de diámetro y 2 m de profundidad.

- 6) Para este pozo, las dimensiones de la campana para almacenar la mitad de biogas producido en un día; o sea $1/2 \times 3 \text{ m}^3 = 1.50 \text{ m}^3$ de biogas, serán; 1.5 m de diámetro, para dejar 0.10 m de holgura con el pozo, y su altura h'

$$V' = \frac{\pi \times (1.5)^2}{4} \times h' = 1.50 \text{ m}^3$$

$$h' = \frac{1.50 \times 4}{(1.5)^2 \times \pi} = \frac{1.50 \times 4}{2.25 \times \pi} = 0.85 \text{ m}$$

por lo tanto, las dimensiones de la campana serán:

$$d' = 1.50 \text{ m}$$

$$h' = 0.85 \text{ m}$$

En la parte superior deberá construirse una pileta de carga conectando el fondo de ésta con el del digestor mediante un tubo de asbesto, el fondo de esta pileta de carga deberá ser - construido en un nivel superior al del digestor para asegurar que la operación de carga y descarga se lleve a cabo por gravedad.

A 180° de la pileta de carga deberá construirse un canal de descarga que comunique al digestor con una pileta construída abajo del nivel superior del digestor.

El digestor normalmente se construye de ladrillos, con un aplanado interior de cemento pulido para evitar filtraciones, pero también puede utilizarse otros materiales de construcción comunes en la región. La campana puede construirse de lámina - de fierro, fibra de vidrio o de otro material, con la condición de que no permita la fuga de biogas.

Los requerimientos y producción de un digestor de 4 m³ - operando a un tiempo de residencia de 25 días, se puede resumir como sigue: alimentando diariamente 50 Kg de estiércol -- fresco de vaca y 110 litros de agua caliente; se producen -- 3.0 m³ de biogas diarios y 160 Kg de lodos residuales. La cantidad de materia prima requerida puede ser recolectada de 5 - vacas no estabuladas.

A continuación aparecen resumidos los datos anteriores:

Volumen del Digestor	: 4.0 m ³
Requerimientos Diarios	: kg de estiércol fresco 50
	No. de vacas no estabuladas ... 5
	litros de agua 110
Dimensiones del Digestor	: diámetro 1.60 m
	profundidad 2.0 m
Dimensiones de la Campana	: diámetro 1.50 m
	altura 0.85 m
Producción Diaria	: biogas: 3.0 m ³
	kcal 16,005
	residuos fertilizantes (kg) ... 160

Tanto el tanque de alimentación como el de descarga se --
construyen de igual forma, colocando una plantilla de 0.60 x 0.60
x 0.10 m de concreto y sobre ella cuatro muros de 60 cm de altu--
ra.

7) Mantenimiento

Es esencial que todos los componentes del sistema estén -
libres de fugas de gas para eliminar pérdidas del mismo, y acumu-
lación de gas combustible en áreas confinadas, por motivos de se-
guridad, así como la entrada de aire al sistema lo que inhibe el
proceso. Por lo tanto, se deberá efectuar una inspección cuidado-
sa del interior del mismo para detectar y corregir problemas de -
construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también -
aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas-
las partes metálicas internas del sistema, así como a las tube---
rías y conexiones en continuo contacto con el biogas.

Se deben quitar las piedras u objetos utilizados como peso sobre la campana para dar presión al gas.

Romper la nata que se forma en la superficie de la mezcla esta nata se puede romper en el momento en que la campana tenga gas, para romper la nata se hace girar en uno y otro sentido la campana. Esta operación se puede hacer una o dos veces por mes, o más seguido, si se observa que la producción de gas es muy baja. En la siguiente figura se muestra el digestor y - las partes que lo constituyen.

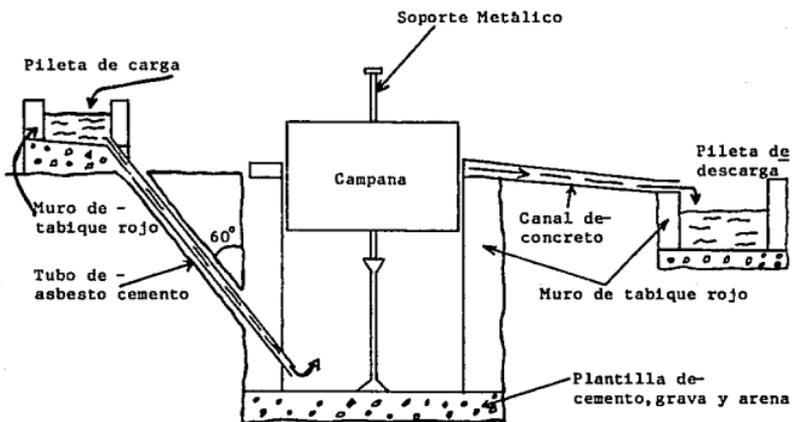


Figura No. 31. Digestor y sus partes constituyentes.

COSTO DE INVERSION DEL DIGESTOR

Los componentes principales del costo involucrado en la construcción de un digestor, son los referentes a los materiales de construcción, la mano de obra y la campana captadora de gases.

A continuación se proporciona la lista de los materiales necesarios para construir un digestor de 4 m³ y 2 piletas para carga y descarga de desechos, así como sus costos.

Los costos de los materiales y mano de obra fueron consultados en el manual BIMSA de la Construcción (Buro de Investigación de Mercados) del mes de Enero de 1993.

COSTO DE LOS MATERIALES

Concepto	Cantidad Necesaria	Costo Unitario (N\$)	Total (N\$)
Tabique recocido	680 pzas.	443/millar	301.24
Cemento	400 Kg	385 tonelada	154.00
Arena común	1.08 m ³	50/m ³	54.00
Grava de 1.5 pulg.	0.293 m ³	55/m ³	16.11
Agua de pipa	1.33 m ³	25/m ³	33.25
Tubo de asbesto	4 m	33/m	132.00
Total = N\$ 690.60			

COSTO DE MANO DE OBRA

Concepto	Cantidad Necesaria	Costo Unitario (N\$)	Total (N\$)
Muros	12.22 m ²	26/m ²	317.72
Plantillas	4.91 m ²	11/m ²	54.01
Aplanado/pulido	12.22 m ²	16/m ²	195.52
Excavación	9.7 m ³	18/m ³	174.60
Colocar tubo de - asbesto	4.0 m	8/m	32.00
Total = N\$ 773.85			

RESUMEN DE COSTOS DE INVERSION

OBRA CIVIL	N\$ 1,464.45
CONTENEDOR DE GAS Y SOPORTES (CAMPANA) (De lámina de fierro cédula # 18)	N\$ 1,375.00
Total = N\$ 2,839.45	

C A P I T U L O X

C O N C L U S I O N E S

Conforme la población mundial crece, y la industrialización aumenta, los países se ven obligados a buscar y emplear nuevas fuentes de energía para satisfacer su demanda energética. Sustituyendo en parte o totalmente las fuentes convencionales sobre todo los combustibles de origen fósil; estadísticamente está confirmado se agotarán estos recursos.

Considerando la gran necesidad de buscar nuevas fuentes de energía, dentro de las cuales nos referimos en este trabajo; a la solar, del viento y la biomásica, podemos obtener las siguientes conclusiones;

- 1.- La radiación directa puede ser transformada en calor o electricidad, dependiendo del uso final deseado.
- 2.- Los sistemas solares pueden ser adecuados desde el punto de vista económico en zonas donde los sistemas tradicionales no llegan o poseen altos costos.
- 3.- Las aplicaciones terrestres en las que se usan sistemas fotovoltaicos, por presentar la mejor opción técnico-económica, son para lugares remotos: iluminación doméstica, bombeo de agua, alumbrado público, TV rural, esterilización de agua para uso doméstico, radiotelefonía rural, señalización en carreteras y cruces de ferrocarril, estaciones repetidoras, señalización en aeropuertos, refrigeración de vacunas y medicinas.-

boyas y plataformas marinas, campismo y equipos electrónicos de baja potencia, entre otros.

- 4.- Desde el punto de vista ambiental, los efectos adversos de -- estas fuentes son despreciables. Los sistemas de calentamiento, donde se incluyen los calentadores solares de agua y estufas para cocinado, tienen un impacto ambiental prácticamente in significativo.
- 5.- En cuanto a la biomasa, ésta constituye una fuente de energía ya que se cuenta con una gran diversidad de recursos renovables disponibles. Los diferentes procesos de conversión dan lugar a una variedad de combustibles entre los que se pueden citar al metano, alcohol, carbón vegetal, etc. y productos se cundarios que pueden ser empleados como fertilizantes.
- 6.- A partir de la biomasa se puede obtener vapor o gases de combustión para generar electricidad.
- 7.- Los sistemas biomásicos pueden ser desde los más sencillos - (a nivel familiar) hasta los más complejos (a nivel de ciudades).
- 8.- En el caso de los digestores, éstos presentan la ventaja de - cumplir con una variedad de tareas, incluyendo la de proporcionar un combustible (biogas), controlar o ayudar a controlar la proliferación de enfermedades y el empleo de los residuos de este sistema como fertilizante, evitando infecciones.
- 9.- Por otra parte, la energía eólica es una fuente de carácter - aleatorio que varía en intensidad y confiabilidad. Los vientos más fuertes se pueden encontrar en islas, costas y montañas.

10.- Aunque las velocidades de viento altas son las más adecuadas en zonas aisladas en las que el costo de los combustibles fósiles es elevado y difícilmente se puede llegar a esos lugares, la energía eólica puede ser económicamente adecuada, -- aún en el caso de velocidades bajas.

Los fines prácticos que los sistemas eólicos pueden alcanzar abarcan actividades tales como: bombeo, calentamiento, ventilación, señalización marina y aérea, comunicación por teléfono, radio, microondas, servicios médicos en clínicas, escuelas y, por supuesto, alumbrado de casas-habitación.

11.- Comparando los costos de inversión inicial del sistema fotovoltaico (N\$ 106,209.00) y sistema eólico (N\$ 56,001.05); en este caso para una aplicación similar el sistema eólico es más económico, siendo ésta su principal ventaja. Sin embargo en un sistema fotovoltaico se tiene la seguridad de funcionamiento, con un costo mínimo de mantenimiento. Además, al ir aumentando en número, representará un ahorro importante de combustible a nivel nacional.

CAPITULO XI
BIBLIOGRAFIA

- 1.- Alonso Concheiro A./Rodríguez Viqueira L.
Alternativas Energéticas
1ª Edición, 1985
Editorial F.C.E.
- 2.- Amaya Morelos Roberto
Manual de Procedimientos para el Cálculo, Diseño y Operación de Digestores de Desechos Orgánicos a partir de estiércol porcino
Instituto de Investigaciones Metalúrgicas
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1978.
- 3.- Asociación de Investigación Eléctrica (ASINEL)
La Biomasa y sus Aplicaciones Energéticas
Programa de Investigación de UNESA
España, Dic. 1982.
- 4.- Brinkword J.B.
Energía Solar para el Hombre
1ª Edición, 1981
Editorial H. Blume
- 5.- Gádiz Deleito J. Carlos
La Energía Eólica, Tecnología e Historia
Editorial H. Blume
- 6.- Cobarg C..C
Energía Solar. Bases y Aplicaciones
Paraninfo, S.A. Madrid, 1983
- 7.- Cordúa Joaquín
Biomasa como Fuente de Productos Químicos y Energía
Comisión Nacional para la Celebración del V Centenario del Descubrimiento de América
Madrid, 1984
- 8.- Cuntuy Guy
Aeromotores y Aerogeneradores
Ediciones Marzo 1980
Barcelona, España, 1981.
- 9.- Daniels Farrington
Uso Directo de la Energía Solar
1ª Edición, 4ª Reimpresión, 1982.
Editorial H. Blume, Madrid

- 10.- Dickson T.R.
Química Enfoque Ecológico
1ª Edición, 1980
Editorial Limusa, S. A. de C.V.
- 11.- Diseño de un Digestor Familiar de 10 m³ de Capacidad
Instituto de Investigaciones Eléctricas. IIE
División de Fuentes de Energía
Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía
Informe 6100/IIE/FE-A20/1
Cuernavaca, Morelos. Nov. 1981.
- 12.- Digestores de Desechos Orgánicos
Instituto de Investigaciones Eléctricas. IIE
Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)
Boletín Energético No. 14 (México)
Enero/Marzo, 1980.
- 13.- Dumón Roger
Energía Solar y Almacenamiento de Energía
1ª Edición Española, 1981
Editorial Toray-Masson, S.A. 1981
- 14.- Eldridge Franck R.
Wind Machine
Mitre Division. The Mitre Corp. 2ª Edición
- 15.- Ellis G. Timothy
Potencial de Biogás en los Países en Desarrollo
Revista Desarrollo Nacional
Abril 1988, págs. 8-10.
- 16.- Escobedo Margarita/Castellanos Alfonso
La Energía Solar en México
Centro de Ecodesarrollo
- 17.- Fulford David
Running a Biogas Programme. A Handbook
Intermediate Technology Publications, 1988.
- 18.- García Galludo Mario
Energía Eólica
Editorial PROGENSA
Sevilla, España, 1987.
- 20.- Hayes Denis
La Energía Solar
Revista Worldwatch,
11 Marzo 1977, págs. 41-46

- 21.- Huerta Morales Ines
Método de Evaluación Económica para Convertidores Eólico-Eléctricos
Tesis De Licenciatura, 1979. Facultad de Ingeniería. UNAM
- 22.- Jacques Villiermaux y Jacques Ledé
Química y Energía Solar
No. 32 Vol. 4, Enero 1984
Revista Mundo Científico
- 23.- Manassah T. Jamal
Alternative Energy Sources Parte A
Academic Press, Inc. 1981
- 24.- Manual de Construcción y Operación de un Digestor de Desechos Orgánicos
a Escala Familiar
Informe IIE/10/14/6100/I-6/P
Cuernavaca, Morelos. Marzo, 1985.
- 25.- Manrique José Antonio
Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas
Editorial Harla, S.A. de C.V. 1984, Págs. 3-9
- 26.- Marcombo, S.A. de Bioxareu Editores
Energía Solar Fotovoltaica
Ediciones Orbis, S.A. 1986,
Barcelona, España.
- 27.- Mandujano Ma. Isabel; Félix A. Alfonso; Martínez Ana María
Biogas. Energía y Fertilizantes a partir de Desechos Orgánicos
Manual para el Promotor de la Tecnología
Cuernavaca, Morelos, México, 1981.
OLADE. SERIE PUBLICACIONES ESPECIALES. No. 6
- 28.- Marshall James
El Aire en que Vivimos
1ª Edición, 1972, págs. 25, 26
Editorial Diana, S.A.
- 29.- Martínez Manuel/Fernández J.L.
Economía de las Fuentes Renovables de Energía
Revista Ciencia Vol. 37, págs. 135-146, 1986.
- 30.- Martínez González Daniel
Diseño y Construcción de un Aerogenerador de 200 watts
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, 1991.
Universidad de Guadalajara
- 31.- Methane Digesters for Fuel Gas and Fertilizer
The New Alchemy Institute-West
Newsletter # 3
L. John Fry Richard Merrill, 1973.

- 32.- Montgomery H. Richard
Energía Solar. Selección de Equipo. Instalación y Aprovechamiento
1ª Edición, 1986
Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- 33.- Morales Clemente Fernando
Biogas, Una Alternativa para Solucionar los Problemas de Energía en Zonas
Rurales
Tesis de Licenciatura, 1987. Facultad de Química, UNAM.
- 34.- Nacional de Conductores Eléctricos, S.A. de C.V.
Los Sistemas Fotovoltaicos
Area de Energía Solar
Marzo, 1986.
- 35.- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
Serie "Desarrollo y Transferencia de Tecnología"
Tecnología para Aprovechar la Energía Solar
Viena, 1979.
- 36.- Park Jack
The Wind Power Book
Cheshire Books, Palo Alto California, 1981.
- 37.- Perlado J.M./Martínez Val/Piera Mireia
Magnitud Potencial de las Fuentes de Energía
Revista ARBOR, Madrid
Febrero 1988, No. 506, págs. 9-40
- 38.- Pichardo Esqueda Joel
Obtención de Energía mediante la Digestión de estiércol de vaca
Tesis de Licenciatura, 1980. ENEP-CUAUTITLAN
- 39.- Revista Solar
La Energía Eólica: Su Naturaleza y Aplicaciones
Asociación Nacional de Energía Solar. ANES
No. 15, Invierno 1988.
- 40.- Saldaña Ricardo, Reyes O.
Elaboración del Atlas Eólico Preliminar para la República Mexicana
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Cuernavaca, Morelos.
- 41.- Saldaña Flores Ricardo
Códigos Computacionales para el Análisis de Generación Eléctrica
por Medio de Sistemas Conversores de Energía Eólica
Memorias de la XI Reunión Nacional de Energía Solar
30 Septiembre; 1,2 de Octubre 1987, págs. 222-226
Villahermosa, Tabasco, México.

- 42.- Santander, Ma. Isabel Mandujano, Ana María Martínez
Diseño, Construcción y Operación del Digestor Comunal
de Desechos Orgánicos
Informe IIE/FE-A2/13
Cuernavaca Morelos, Agosto 1979.
- 43.- Sasson Albert
Las Biotecnologías, Desafíos y Promesas
UNESCO 1981
Centro de Investigaciones Biológicas
- 44.- Szokolay, S.V.
Energía Solar y Edificación
1ª Edición 1978
Editorial Blume
- 45.- Toledo Alejandro
Energía, Ambiente y Desarrollo
Volúmen XV, 1ª Edición, 1988
Centro de Ecodesarrollo
- 46.- Work Kenneth/Warner F. Cecil
Contaminación del Aire
1ª Edición, 1990
Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- 47.- Wionczek S. Miguel/Foley Gerald
La Energía en la Transición del Sector Agrícola de Subsistencia
1ª Edición 1983
El Colegio de México
- 48.- Wolfgang Palz
Electricidad Solar. Estudio Económico de la Energía Solar
2ª Edición, 1979.
Editorial H. Blume