

128
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

NUEVAS FUENTES DE ENERGIA PARA LA
PRODUCCION O SUBSTITUCION DE
ENERGIA ELECTRICA

T E S I S
Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P r e s e n t a

TOLEDO BECERRIL EVA

México, D. F.

1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I ENERGIA SOLAR	
1.1. Generalidades.....	6
1.2. Colectores solares.....	12
1.3. Calentamiento de agua.....	32
1.4. Refrigeración y calefacción de edificios.....	54
1.5. Generación de electricidad.....	65
a) Ciclos Termodinámicos.....	66
b) Celdas Fotovoltáicas.....	79
1.6. Energía del viento.....	88
1.7. Diferencias de temperaturas en los océanos.....	93
1.8. Energía a partir de materiales orgánicos.....	98
1.9. Energía de las olas.....	102
1.10. Energía de las mareas.....	104
CAPITULO II ENERGIA GEOTERMICA	
II.1. Generalidades.....	113
II.2. Reservorios geotérmicos.....	117
II.3. Desarrollo de la geotermia en el mundo.....	128
II.4. Desarrollo y potencial geotérmico de México.....	137
II.5. Campo geotérmico de Cerro Prieto.....	147
II.6. Problemas ambientales.....	163
II.7. Perspectivas futuras de la energía geotérmica.....	175
BIBLIOGRAFIA.....	180

INTRODUCCION

Desde los inicios de la civilización, el hombre ha buscado fuentes de energía para satisfacer sus necesidades. Probablemente la mayor parte de los conflictos internacionales a través de la historia han tenido su origen en el deseo de poseer o controlar regiones favorecidas con abundantes recursos energéticos. Por lo que podría esperarse que una solución permanente y definitiva al problema energético contribuya sustancialmente a la convivencia pacífica de la humanidad.

Claramente ni las necesidades ni los recursos energéticos del planeta son conocidos en forma exacta. Sin embargo en base a las estadísticas existentes y a los recursos energéticos ya conocidos se hacen predicciones hacia el futuro, las cuales nos permiten plantear el problema energético en general.

En octubre de 1973, el mundo fue sacudido por el embargo que los países árabes impusieron en su producción de petróleo y por la subsiguiente elevación del precio de venta de dicho combustible. Las demandas no satisfechas de Europa, Japón y Estados Unidos, originaron una serie de restricciones internas que a su vez fueron limitadas en otras partes del mundo. La era del consumo ilimitado había terminado.

El mundo trata hoy de modificar sus estructuras hacia otras que permitan un uso racional de los recursos finitos. El proceso de cambio es de gran trascendencia, y a pesar de las grandes reservas que se tienen de energía fósil, existe una clara conciencia mundial de que estas reservas son finitas y que es necesario y urgente sustituir estas por otras fuentes de energía. El petróleo y gas natural tomados conjuntamente representan el 60% -

de los energéticos que se consumen en el mundo, el carbón el 35% y el restante 5% se consume en forma de energía hidroeléctrica, combustión de madera, etc. Por otra parte cabe mencionar que el carbón, petróleo y similares son materias primas y que el quemarlas constituye un desperdicio imperdonable.

Según John W. Simpson de Westinghouse, a un ritmo promedio de crecimiento del consumo de un 5% anual, la producción del petróleo mundial -- cerca del año de 1990 ya no será suficiente para satisfacer la demanda, siendo necesario sustituir ésta por otros energéticos.

Por otra parte en un principio se pensó que la fisión nuclear podría satisfacer todas las necesidades futuras de energía, sin embargo, la creciente oposición pública a la potencia nuclear junto con el gran aumento del costo de las plantas de este tipo, introdujeron la posibilidad de que la energía nuclear pudiera no ser una opción viable de energía.

Las condiciones anteriores determinan que la economía mundial debe transformarse lo antes posible para reducir drásticamente la dependencia - desproporcionada que se tiene de los recursos finitos, utilizando otras nuevas fuentes de energía que existen en abundancia y deben ser desarrolladas a nivel mundial.

Por ello debemos proyectar el desarrollo de nuestros recursos para minimizar los efectos negativos del impacto resultante de las medidas que adopten los países avanzados y para poder establecer un sistema más eficiente y racional para un mejor aprovechamiento de nuestras fuentes de riqueza.

Este reporte tiene por objeto analizar de una manera general el apro-

vechamiento y la posibilidad de desarrollar otras fuentes de energía no nucleares, como son la energía solar y la energía geotérmica, para la solución de problemas locales específicos.

Estas nuevas fuentes deberán asimismo evitar el aumento de la contaminación del medio ambiente, reduciéndolo a niveles que no pongan en -- peligro la existencia de la fauna, la flora y la misma humanidad. Es pues evidente el desafío que enfrentamos.

ENERGIA SOLAR

1.1.

GENERALIDADES.

El tema de la utilización de la energía solar es bastante extenso debido a que no solamente abarca el uso directo de la radiación solar para la producción de electricidad en celdas Fotovoltáicas y el uso del calor debido a la radiación solar para calefacción, refrigeración y la producción de electricidad a través de procesos termodinámicos, sino también el uso de fuentes que dependen indirectamente de la energía solar, tales como el viento, las olas, la diferencia de temperatura en los océanos y la utilización de materia orgánica para la obtención de combustibles y energía. Se discutirán estas fuentes una por una y se dará una idea general de sus posibilidades para la contribución futura al suministro de energía en México.

La cantidad de energía solar que recibe la tierra es muy grande. A escala del globo, la energía solar que se recibe en 102 semanas es equivalente a la energía fósil almacenada en todas las reservas conocidas de carbón, petróleo y gas natural.

Sin embargo, la energía solar tiene dos desventajas; la primera que es difusa y por lo tanto debe ser concentrada por algún medio, la segunda que es intermitente, debido a que el sol solo brilla durante el día y además frecuentemente es oscurecido por las nubes, por lo tanto la energía debe poder almacenarse para tenerla disponible cuando se requiera usarla.

La luz solar que llega a la atmósfera exterior de la tierra transporta energía a razón de 1.36 KW/m^2 . El área iluminada recibe, en términos de calor, un equivalente de 157.5 Kcal./m^2 por hora; las medidas que se han realizado en diversos lugares han mostrado (incluyendo noche y día, invierno y verano, días claros y nublados), que durante un año entero la energía -

del sol que llega a la tierra es equivalente a 177 watts/m^2 por hora.

Si se logra hacer arreglos para recolectar la energía a pesar de su difusión sobre un área grande, podrá disponerse de grandes cantidades de energía. Por ejemplo, el promedio de la energía solar que incide en una hectárea equivale aproximadamente a 1775 Kw. por hora.

Para tratar el problema básico de la intermitencia característica de la energía solar, se requiere de una tecnología no muy cara para almacenar grandes cantidades de energía. El costo de almacenamiento es generalmente una fracción significativa del costo de instalación, por lo tanto se están realizando trabajos de investigación y desarrollo para el almacenamiento de energía solar.

Debido a la conciencia actual en cuanto a la disponibilidad limitada de energéticos de origen fósil, tales como petróleo, gas natural y carbón, se ha hecho evidente la necesidad de aprovechar más racionalmente estos recursos, por lo que es necesario aprovechar otras fuentes de energía, -- entre ellas la solar. Este aprovechamiento es más viable en países como el nuestro con extensas áreas que reciben altos niveles de insolación.

Puede considerarse que México recibe energía solar a una tasa promedio de 0.6 Kw/m^2 durante un periodo de insolación medio anual de 8 - horas diarias, o sea, que reciben anualmente alrededor de $9.6 \times 10^{12} \text{ KWH}$ de energía solar.

Para determinar la distribución de la radiación solar en México, se desarrolló un modelo que emplea información proporcionada por los satélites meteorológicos "Nimbus III y ESSAB"; además de considerar la cobertura

ra nebulosa en 117 ciudades en todo el país, se calcularon las radiaciones globales mensual y anual. El valor medio diario de la radiación global anual en calorías/cm² por día se presenta en la Tabla 1.1.1.

TABLA 1.1.1.
DISTRIBUCION DE INSOLACION EN MEXICO

<u>Características</u>	% de la superficie total	Superficie
Areas que reciben más de 500 cal/cm ² diario	38	749, 570 Km ²
Areas que reciben entre 400 y 500 cal/cm ² diario	57	1, 124, 350 Km ²
Areas que reciben menos de 400 cal/cm ² diario	5	98, 627 Km ²

De esta distribución se puede ver que casi el 40% del territorio nacional (mapa de la Fig. 1.1.1.) dispone de más de 500 cal/cm² al día, valor que garantiza resultados excelentes para aplicaciones solares futuras.

Las condiciones son particularmente favorables en el noroeste de México, incluyendo la península de Baja California, que es el área de mayor potencial.

Como se mencionó en la tabla anterior las perspectivas para el uso efectivo de la energía solar son buenas, pero la energía solar no tendrá un gran impacto sobre el total de la demanda de la energía a corto plazo, ya que se requiere desarrollar mucha tecnología antes de que pueda ser lograda

económicamente una producción en gran escala en las áreas con altos niveles de insolación.

Para analizar el posible uso de la energía solar se considerarán procesos de conversión térmica, procesos de conversión fotovoltaica, calefacción y refrigeración de edificios y las formas indirectas de aprovechamiento de la energía del sol.

INSOLACION MEDIA DIARIA (calorias x cm²/dia)

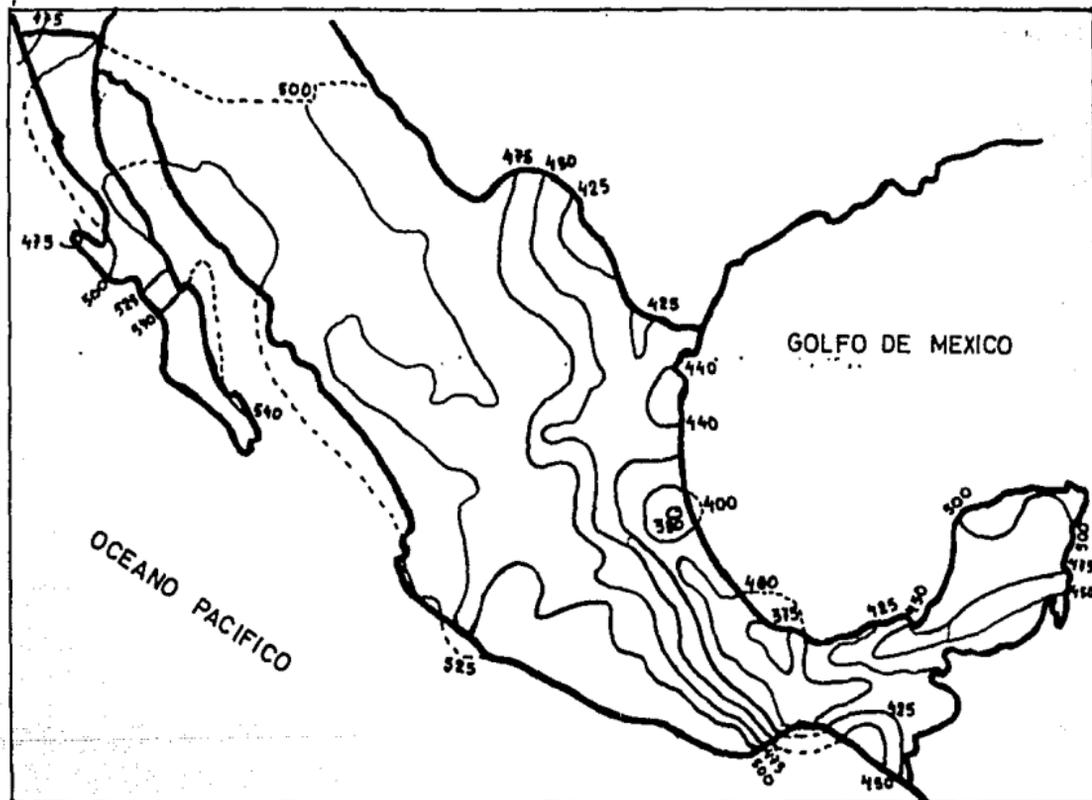


FIGURA (I.1.1)

1. 2.

COLECTORES SOLARES.

El conocimiento del grado de insolación de las diferentes áreas de un país es de suma importancia para el aprovechamiento de la energía solar, ya que nos permitirá establecer en que localidad, fecha y tiempo del día es conveniente captar dicha energía, ya sea a través de un colector que solamente concentre la radiación directa del sol (colectores de concentración), o a través de colectores que puedan absorber tanto la radiación directa como la radiación difusa (colectores de lámina plana).

Hasta la fecha los colectores han sido construídos de muy diversos materiales y en una gran variedad de diseños. Entre sus aplicaciones se encuentran: el calentamiento de agua, calentamiento de algunos fluidos para procesos de refrigeración, calentamiento de aire y otros gases, etc. El principal objetivo de los colectores ha sido la captación de la mayor cantidad de radiación solar posible a la temperatura más alta obtenible, tratando de lograr esto con la menor inversión en materiales y mano de obra. Además de estos objetivos un colector solar debe tener una vida efectiva de varios años, a pesar de los efectos adversos de la radiación solar ultravioleta, de la corrosión, del posible congelamiento en el caso del agua y de la acumulación de polvo y humedad en el caso del aire, y del rompimiento del arreglo transparente debido a la expansión térmica, al granizo, o a otras causas.

Existen diversos tipos de colectores heliotérmicos, no obstante se hará mención de los que se consideran de mayor importancia por sus aplicaciones, a saber:

- 1.) Colectores solares de lámina plana

2.) Colectores solares de concentración o enfoque.

A continuación se ofrecerá una breve descripción de cada uno de ellos.

COLECTORES DE LAMINA PLANA

Un colector de lámina plana consiste generalmente de cinco componentes, las cuales se muestran en la figura 1.2.1. y se describen a continuación:

1. ARREGLO TRANSPARENTE, que puede estar constituido por una o más hojas de vidrio, o bien por una hoja o película de plástico.

2. TUBOS, que se usan para conducir el fluido de trabajo desde el ducto de entrada o cámara de circulación hasta la salida.

3. LAMINA, generalmente de metal, puede ser lisa, corrugada o ranurada, la cual está unida a los tubos de alguna forma que produzca una buena unión térmica.

4. AISLAMIENTO, que sirve para minimizar las pérdidas de calor de la lámina hacia la parte inferior de la misma.

5. CAMISA O CUBIERTA, la cual envuelve las componentes anteriores y las mantiene libres de polvo, humedad, etc.

MATERIALES DEL ARREGLO TRANSPARENTE.

El vidrio es el principal material usado en los colectores solares planos, ya que tiene la propiedad de transmitir el 90% de la radiación solar de onda corta entrante y no permitir escapar hacia afuera la radiación

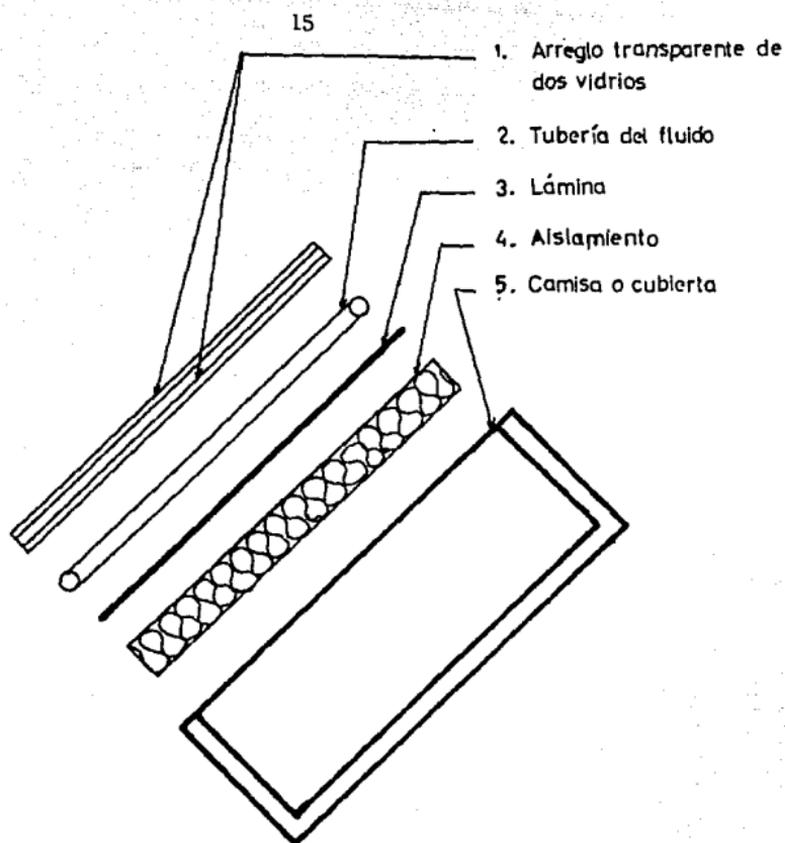


FIG.1.2.1. Colector de lámina Plana

térmica de onda larga emitida por la lámina plana. El vidrio de bajo contenido de hierro posee una transmitancia relativamente alta (aproximadamente de 0.85 a 0.90 con un ángulo normal de incidencia) para el espectro solar de onda corta (0.3 a 3.0 micras), y en cambio su transmitancia es casi cero para la radiación térmica de onda larga (3.0 a 50 micras).

El vidrio que se usa en colectores solares planos puede ser de resistencia sencilla (0.21 a 0.25 cm. de grueso) o de resistencia doble (0.3 a 0.34 cm.), o bien vidrios de ventana o de invernadero cuyas transmitancias de onda corta a incidencia normal son de 0.87 y 0.85 respectivamente.

El factor más importante en la reducción de la transmisión a través del arreglo transparente de los colectores solares es el 4% de reflexión existente en cada interfase aire-vidrio, aunque la transmitancia pueda ser aumentada en un 3% usando vidrio "agua blanca". Los revestimientos antirreflexivos también logran un mejoramiento muy significativo en la transmisión, pero los costos del proceso son muy elevados.

Otro material que se utiliza en el arreglo transparente es el plástico, ya sea en forma de hojas o películas, sin embargo debido a que la mayoría de las variedades que se pueden usar poseen bandas de transmisión a la mitad del espectro de la radiación térmica, se tienen transmitancias de onda larga de 0.40 las cuales son sumamente altas.

Además los plásticos están también limitados por las temperaturas que pueden soportar sin sufrir cambios dimensionales y hasta la fecha solo unas pocas de las variedades disponibles pueden resistir la radiación ultra

violeta del sol por largos periodos de tiempo. No obstante poseen las propiedades de ser altamente resistentes a la acción del granizo y de las piedras, y en forma de películas delgadas son altamente flexibles.

El efecto del polvo en el arreglo transparente del colector es sorprendentemente pequeño, y parece que el efecto limpiador de la lluvia es el adecuado para mantener la transmitancia próxima a su máximo valor.

El propósito fundamental del arreglo transparente es admitir tanta radiación solar como sea posible y reducir las pérdidas de calor hacia la atmósfera. El vidrio es opaco a la radiación de onda larga que es emitida por la lámina, pero la absorción de esa radiación causa que la temperatura del arreglo transparente aumente, y por lo tanto que se pierda calor hacia la atmósfera. Esta pérdida de calor puede ser reducida usando una cubierta reflectora infrarroja en la parte inferior del vidrio, sin embargo tales revestimientos son costos y además reducen en un 10% la transmitancia efectiva del vidrio.

En suma el arreglo transparente además de servir como trampa de calor admitiendo la radiación de onda corta y reteniendo la radiación térmica de onda larga, también reduce las pérdidas de calor por convección. El efecto de aislamiento del vidrio se puede mejorar usando varias hojas de vidrio, u hojas de vidrio con plástico.

LAMINAS COLECTORAS, TUBOS Y CUBIERTA

La función primaria de la lámina colectoras es absorber tanta radiación como sea posible captándola a través del arreglo transparente con la

finalidad de perder la menor cantidad posible de calor hacia la atmósfera y hacia la parte inferior de la cubierta y para transferir el calor retenido hacia el fluido de trabajo. La absorptancia de la radiación solar de onda corta de la superficie del colector depende de la naturaleza y color de la cubierta, y del ángulo de incidencia, como se muestra en la tabla 1.2.1, para una lámina pintada de negro.

En la actualidad por medio de tratamientos electroquímicos o químicos, es posible producir superficies que tengan altos valores de absorptancia de radiación solar y bajos valores de emitancia de onda larga.

Tales superficies llamadas "superficies selectivas" consisten de una capa superior muy delgada que es altamente absorbente de la radiación solar de onda corta, pero poco transparente a la radiación térmica de onda larga. El sustrato debe tener una alta reflectancia y una baja emitancia para la radiación de onda larga.

Si el objetivo de un colector es calentar líquidos, los tubos deberán estar integrados o pegados a la lámina con una buena unión térmica. El método de pegar los tubos a la lámina colectora ha desafiado el ingenio de los diseñadores en todas las partes del mundo. El mayor problema es obtener una buena unión térmica sin recurrir a costos excesivos de mano de obra y materiales.

Los materiales que más se usan para láminas colectoras, en orden decreciente de costos y conductividad térmica, son el cobre, el aluminio y el acero. Es importante destacar que si el área completa del colector es barrida por el fluido de trabajo, la conductividad térmica se vuelve in-

TABLA 1.2.1. Variación de la transmitancia del arreglo transparente con uno y dos vidrios y de la absortancia de una lámina pintada de negro con respecto al ángulo de incidencia.

ANGULO DE INCIDENCIA (GRADOS)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
TRANSMITANCIA										
UN VIDRIO	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.84	0.79	0.68	0.42	0.00
DOS VIDRIOS	0.77	0.77	0.77	0.76	0.75	0.73	0.67	0.53	0.25	0.00
ABSORTANCIA										
PARA UNA LAMINA PINTADA DE NEGRO	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.92	0.88	0.82	0.67	0.00

significante. Estudios de la conductancia de la unión entre la lámina y los tubos demuestran que los ductos de acero son tan buenos como los de cobre solo si la conductividad térmica de la unión es buena. Entre las mejores alternativas se encuentran las láminas unidas con tubos integrales, sin embargo estas requieren medios masivos de producción.

En la conferencia de Nuevas Fuentes de Energía en 1961, Francia propuso el uso de estructuras transparentes porosas entre la superficie de la lámina plana del colector y su cubierta de vidrio. La porosidad suprime la convección en un grado muy marcado y la pérdida de radiación de onda larga es también disminuida significativamente. Estudios más recientes han verificado esta propuesta y la investigación en este campo está continuándose para encontrar materiales porosos que sean suficientemente baratos y durables para ser usados a gran escala.

La figura 1.2.2. muestra algunos colectores solares planos que han sido usados en calentadores tanto de agua como de aire, con diferentes niveles de éxito.

La cubierta que contiene a la lámina colectora, al aislamiento y sostiene el arreglo transparente, puede ser hecha con un armazón de madera y un respaldo en la cabecera resistente a la humedad, o bien puede ser construido de hoja metálica, cuidadosamente pintada para resistir la oxidación. El asbesto-cemento es otro material que ha sido usado exitosamente, pero es relativamente pesado y además es frágil.

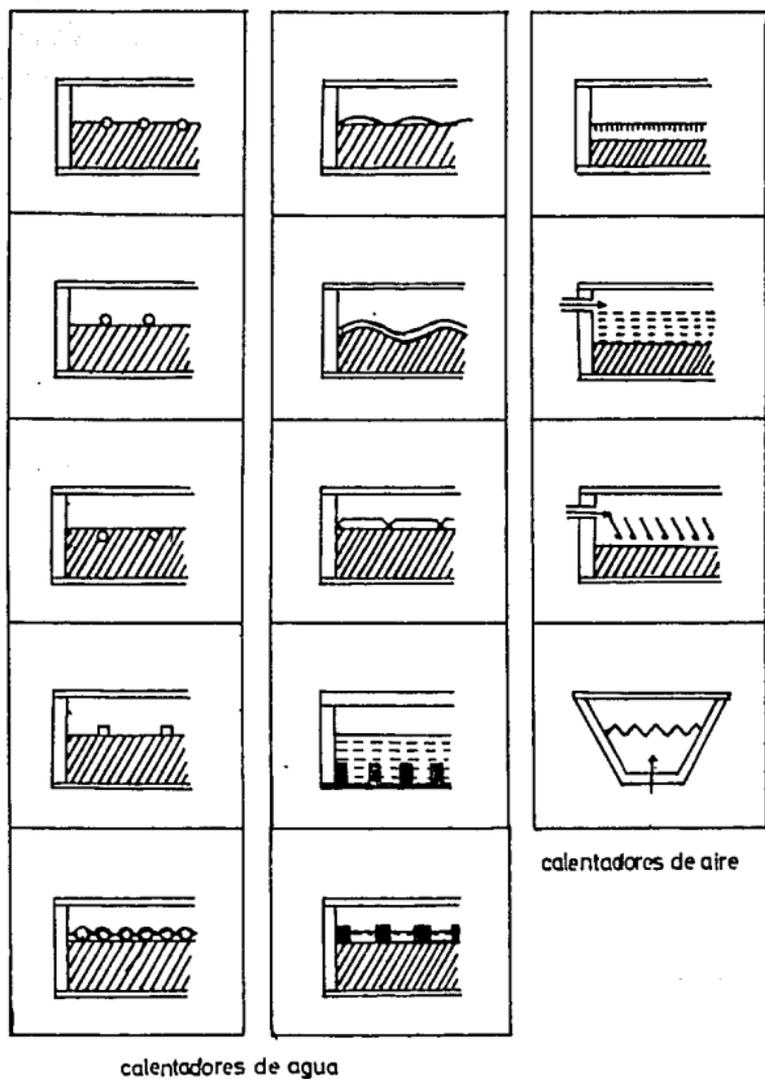


FIG.1.2.2. Diversos Tipos de Colectores Planos

COLECTORES DE CONCENTRACION O ENFOQUE

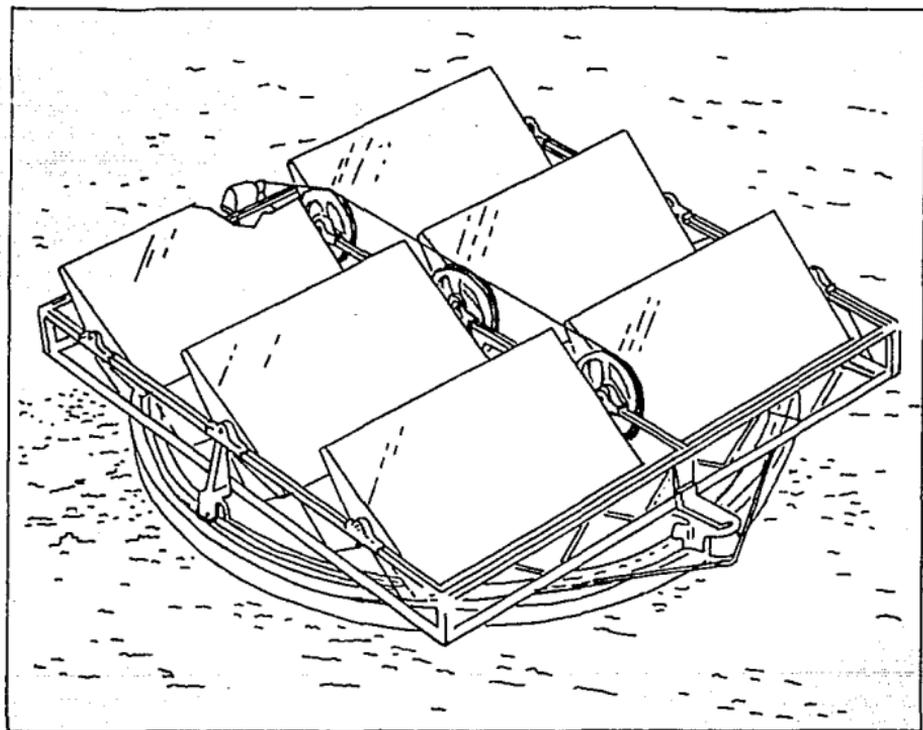
Pueden alcanzarse temperaturas muy superiores a las obtenidas con colectores de lámina plana si se concentra una gran cantidad de radiación solar en un área relativamente pequeña. El uso de un simple reflector de secciones planas (Fig. 1.2.3.) puede incrementar la cantidad de radiación directa alcanzada por una superficie colectora en un grado bastante notable, pero debido al movimiento del sol a través del cielo, los colectores de concentración deben ser capaces de "rastrear al sol" durante su movimiento diario.

Las superficies reflectivas con secciones transversales parabólicas (Fig. 1.2.4.) que se mueven de este a oeste, requieren una mínima cantidad de ajuste ya que solo necesitan corregirse para cambios en la declinación del sol. Desde luego que existe un grado de sombreado durante la mañana y la tarde en los extremos finales del tubo absorbedor, el cual está montado generalmente a lo largo de la línea focal de la sección parabólica, sin embargo se han obtenido resultados satisfactorios en Francia y en Rusia.

Los colectores de concentración pueden obtener temperaturas sumamente altas, pero requieren sistemas de rastreo muy precisos y solamente pueden usar los rayos directos del sol, ya que la radiación difusa no puede ser concentrada.

Existen dos métodos elementales para rastrear al sol. El método altazimut requiere que la superficie rastreadora cambie su altitud y su azimut, de tal forma que siga al sol en su movimiento a través del cielo. El -

FIG. 1.2.3. Perfil del Diseño de un Helioestado Multifasético



otro método consiste en un montaje ecuatorial en el cual el eje del concentrador apunta de norte a sur y está arreglado de tal forma que pueda cambiar su inclinación angular para compensar las variadas declinaciones del sol. El movimiento diario del colector es rotacional a razón de $15^\circ/\text{hr}$, de tal forma que compense el movimiento del sol. Algunos investigadores reportan el uso de una superficie parabólica montada en el ecuador la cual intercepta un haz de radiación solar de 1.83 por 2.44 m. y calienta un fluido a 315°C .

El uso principal de los colectores de concentración hasta ahora ha sido en la producción de vapor o de fluidos de alta temperatura para que sean usados en procesos de refrigeración o generación de potencia. Sin embargo existen desventajas que deben tenerse en mente, como son: los altos costos y la complejidad mecánica de los colectores que deben seguir al sol y la incapacidad de estos para funcionar en días nublados.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS COLECTORES DE CONCENTRACION CON RESPECTO A LOS COLECTORES DE LAMINA PLANA.

1. - Las superficies reflectivas de los colectores de concentración requieren menos material y son estructuralmente más simples que las de los colectores planos.

2. - El área absorbidora de un colector de concentración es más pequeña que la de un colector de lámina plana con la misma área de colección de energía solar, por lo tanto la intensidad de insolación es mayor.

3. - Debido a que el área desde la cual se pierde calor hacia los al-

rededores es menor en un colector de concentración que en un colector de lámina plana y ya que la insolación en el absorbedor es más concentrada, entonces el fluido de trabajo puede lograr temperaturas más altas en un sistema de concentración que en uno de lámina plana que tenga la misma superficie colectora de energía solar.

4. - Debido a que el área de absorción de un colector de concentración es pequeña en relación con el área de reflexión de la energía solar, los tratamientos de superficies selectivas y los de aislamiento por vacío para reducir las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia del colector son económicamente factibles.

5. - Los sistemas de concentración pueden usarse para generar energía eléctrica cuando no sean usados para calefacción o refrigeración. Por lo tanto el tiempo total útil de operación por año puede ser mayor que el de un colector de lámina plana y el costo inicial de la instalación del sistema puede recuperarse con el ahorro de energía en un período corto de tiempo.

6. - Ya que la temperatura que se puede obtener con un colector de concentración es más alta, entonces la cantidad de calor que puede ser almacenada por unidad de volumen es mayor y en consecuencia los costos de almacenamiento de calor son menores que los de los sistemas que utilicen colectores planos.

7. - En aplicaciones de calefacción y refrigeración solar, un sistema de concentración puede lograr temperaturas del fluido de trabajo más altas, lo que hace posible obtener eficiencias mayores en el ciclo de refrigeración y costos inferiores de acondicionamiento de aire.

8. - Un colector de concentración puede o no requerir pequeñas cantidades de anticongelante para proteger al absorbedor, mientras que en un colector de lámina plana toda la superficie de colección de energía solar requiere protección anticongelante en climas fríos.

9. - Los colectores de concentración captan menos radiación difusa que los colectores de lámina plana.

10. - En algunos sistemas de concentración es necesario tener un pequeño absorbedor que rastree la imagen del sol (fig. 1.2.5); en otros el reflector tiene que poder ajustarse a varias posiciones si se desea que opere durante todo el año (Fig. 1.2.3. y 1.2.4).

11. - Algunos sistemas de concentración requieren una conexión flexible debido al movimiento rastreador del colector para sacar el fluido de trabajo caliente fuera del absorbedor. Tal conexión puede necesitar servicio anual de mantenimiento.

12. - Existe poca experiencia en la operación de sistemas colectores reflectores estacionarios de alta concentración por lo tanto se debe llevar a cabo más trabajo de investigación y desarrollo para obtener experiencias y confianza en la operación, ingeniería y mantenimiento de tales sistemas.

Las principales ventajas de los sistemas de concentración sobre los colectores de lámina plana fueron dadas anteriormente y en forma resumida, estas son:

1) Un sistema de concentración a una temperatura dada tiene una eficiencia de colección más alta.

2) El fluido de trabajo puede ser calentado a una temperatura mu-

FIG. I.2.4. Colector Cilíndrico Parabólico

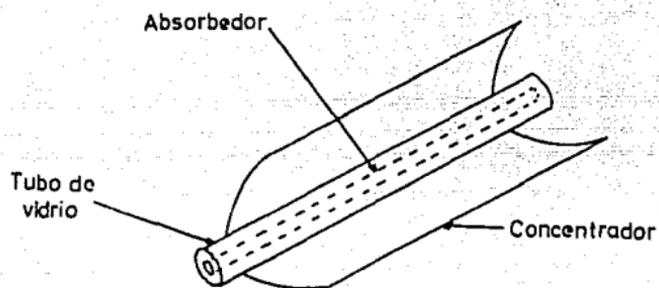
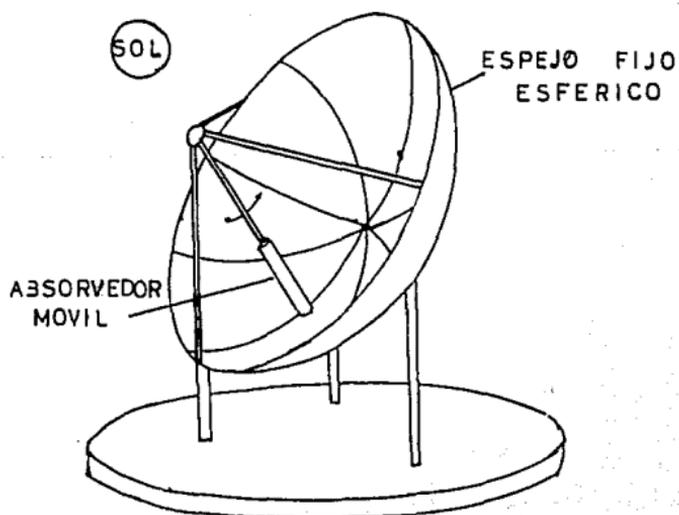


FIG. I.2.5. Colector Solar de Reflector Estacionario y Absorbedor Rastreador.



cho mayor que en un colector plano.

3) El almacenamiento de energía por unidad de volumen es mayor y por lo tanto menos cara.

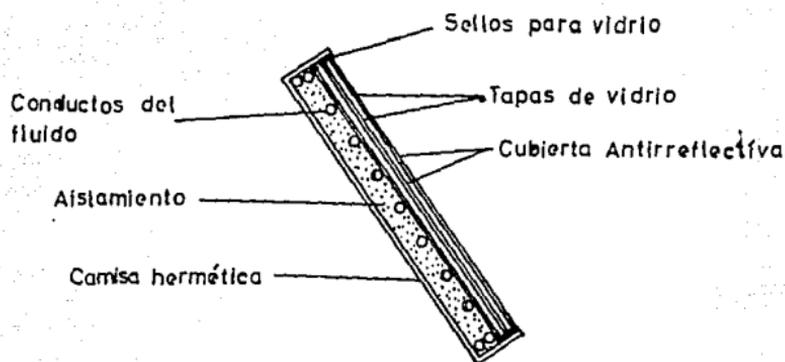
4) Debido a que la temperatura de trabajo que se puede obtener con un sistema de concentración es más alta, es posible generar electricidad y utilizar el sistema una gran parte del año.

5) Los costos de la energía entregada por un sistema de concentración solar parecen ser menores que los costos de la energía entregada por los colectores de lámina plana en lugares soleados del mundo.

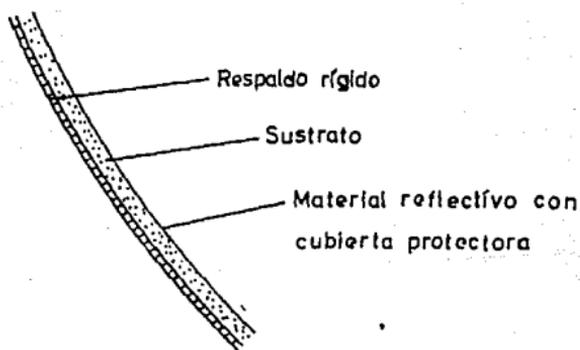
6) Los sistemas de concentración también prometen una considerable economía de uso.

Una razón de los costos más reducidos de la energía entregada se ilustra claramente en la Fig. 1.2.6., la cual muestra las secciones transversales de un colector típico de lámina plana y la superficie reflectiva de un sistema de concentración tipo absorbedor. El colector de lámina plana requiere al menos una, pero probablemente dos láminas de vidrio separadas por un espacio de aire, debajo de estas láminas de vidrio debe existir un medio para conducir el fluido de trabajo y absorber la energía solar. Finalmente el colector de lámina plana requiere una capa de aislamiento para reducir las pérdidas térmicas por el lado de abajo.

Se estima que el costo de los materiales, incluyendo los sellos para las láminas de vidrio, valdrán por lo menos 37.65 dólares/m² a los precios actuales, y si uno estima que los costos de mano de obra se incrementarán aproximadamente en la misma proporción que las materias pri -



(a)



(b)

FIG. 1.2.6. Comparación de las técnicas de construcción de (a) una lámina plana (b) un colector de concentración

mas, parece improbable que los colectores de lámina plana valgan siempre ya instalados menos de 75.30 dolares/m².

En contraste con la complejidad de un sistema colector de lámina plana, la superficie reflectiva de un colector de concentración es extremadamente simple. Esta consiste de una capa delgada de material reflectivo y un substrato amoldado a la forma apropiada, que puede estar hecho de material barato tal como el poliuretano, ciertos plásticos, o bien concreto. Los reflectores contruidos de uretano o plástico de peso ligero necesitan una estructura de soporte para mantener la forma de reflector. El material reflectivo se estima que cuesta entre 3.25 y 5.40 dolares/m² y la estructura soporte cerca de 21.50 dolares/m² bajo una producción en serie. Aún si se considera que estas cifras del costo son optimistas y si se les aumenta un 50% parece ser completamente posible que un colector reflector pueda ser manufacturado a cerca de 48.40 dolares/m², o aproximadamente a las dos terceras partes del costo de los colectores planos. Esta estimación incluye una tolerancia de 10 veces el costo del absorbedor, al cual se le estima una área superficial de aproximadamente el 3% del área de la superficie reflectora.

La reducción en costo por metro cuadrado del área de abertura, junto con la más alta eficiencia de captación, indican que el costo de la energía térmica obtenible con un sistema de concentración será considerablemente menor que el costo común de colección de energía con colectores de lámina plana.

EFICIENCIA DE UN COLECTOR.

La eficiencia de un colector solar puede ser definida como la razón de la energía transferida al fluido de trabajo entre la energía radiante que es absorbida por el colector durante el periodo en consideración.

$$\eta = \frac{\text{Energía transferida al Fluido}}{\text{Energía radiante que llega al colector}}$$

Las eficiencias instantaneas durante la mitad del día cuando el ángulo incidente es favorable, son mayores que las eficiencias de todo el día, las cuales deben tomar en cuenta las declinaciones del sol principalmente en las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde.

1. 3 .

CALENTAMIENTO DE AGUA

Un calentador solar de agua doméstico permite aprovechar una parte de la radiación solar para calentar agua y satisfacer parcial ó totalmente la demanda de la casa-habitación donde se instale. El valor medio de la radiación de energía solar en una región despejada es de 0.6 KW/m^2 , aunque en la ciudad de México los niveles de radiación no alcanzan fácilmente esta magnitud. La radiación total diaria integrada alcanza el valor de 5 a 8 KWH/m^2 ; con este último valor y con el 100% de eficiencia de conversión de energía, - un día promedio representaría 6880 calorías, que es el calor necesario para aumentar la temperatura de 138 Litros de agua de 10° C a 60° C . Con un - 80% para la eficiencia del calentador cada metro cuadrado sería capaz de calentar 95 litros de agua de 10° C (Temperatura media de entrada al calentador) hasta 60° C (temperatura media de salida del calentador).

El diseño de un calentador solar puede enfocarse desde dos puntos -- de vista; por una parte considerando las condiciones climatológicas más desfavorables y las características de demanda de agua caliente más severas. Entonces la construcción del calentador sería prohibitiva, tanto por el costo como por la superficie de captación y el volumen de almacenamiento. Por otro lado puede adoptarse un criterio optimista, diseñando el calentador para operar en condiciones normales y aún superiores a las normales, en este caso puede construirse un calentador de tamaño moderado pero, desde luego no sería capaz de proporcionar toda el agua caliente que se requeriría en cualquier época del año. En este caso se debe suponer la instalación en serie de un calentador auxiliar instantáneo de gas o electricidad del tipo de paso, o una fuente de calor auxiliar instalada en el mismo tanque de almace

namiento de agua caliente asociado con el calentador solar. En cualquier caso puede demostrarse que la instalación de un calentador solar reduce el consumo de gas o de energía eléctrica hasta en un 80% o más y si se diseñan calentadores a un precio de \$5,000.00 pesos, este ahorro en combustible amortiza el costo de la instalación en unos dos o tres años. También el calentador solar debe tener una vida útil no inferior a 10 años y -- operar con mantenimiento casi nulo.

Considerando la experiencia de fabricación de calentadores solares en México (principalmente en Guadalajara), en el Instituto de Ingeniería -- de la UNAM, se llegó a dos diseños básicos que son:

- El calentador Solar Doméstico tipo "Convencional"
- El calentador solar doméstico tipo "Integral"

El primero es esencialmente del tipo actualmente fabricado en México con fuertes modificaciones en la utilización de materiales y el diseño del tanque separado de agua caliente. El segundo consiste de una sola unidad integrado el colector y el depósito aislado de agua caliente. De estos dos diseños las diferencias fundamentales son las siguientes:

- I) En igualdad de capacidad térmica y de agua el calentador integral ocupa menos espacio que el convencional.
- II) Para pequeña producción, el tipo convencional es más barato; para altos volúmenes que requieran automatización el integral es más económico de producir.
- III) El diseño integral es más eficiente ya que no tiene tuberías donde el calor se pierda, ni caídas de presión -- por fricción en ductos.

La posibilidad de proporcionar calentamiento auxiliar al solar se expondrá más adelante bajo el título de "Calentadores solares híbridos", ya sea en diseños convencionales o integrales. También se analizan las diversas alternativas desde el punto de vista económico.

CALENTADOR SOLAR CONVENCIONAL

El diseño convencional o de tanque separado puede ser adoptado en forma masiva ya que puede fabricarse con procesos de manufactura artesanales, sin mayor complejidad que la que un herrero enfrenta al hacer una puerta o una ventana. Consisten fundamentalmente de dos partes físicamente separadas, la primera es el colector solar que es donde el agua se calienta y la otra el tanque de depósito o tanque térmico. Los parámetros fundamentales de diseño son: capacidad nominal, captación, termosifón, pérdidas térmicas y costos. Los diseños descritos en este trabajo pueden desarrollarse comercialmente en dos formas, en pequeña escala o en gran escala (producción en serie) dando oportunidad de creación a nuevas empresas.

El diseño básico del calentador solar convencional se basa en los aparatos comerciales tales como el mostrado en la fotografía de la figura 1.3.1., Un diseño mejorado notablemente por el Instituto de Ingeniería se muestra en la figura 1.3.2., donde la superficie de captación ha sido distribuida más convenientemente, abatiendo así las pérdidas por fricción como parte del costo. El aparato estudiado se muestra esquemáticamente en la figura 1.3.3.

La circulación de agua en el calentador se presenta en la figura 1.3.4. Por su mayor densidad, el agua más fría se deposita en la parte más

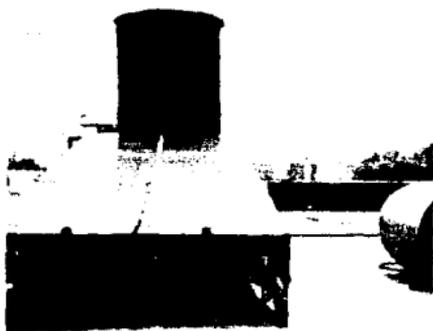


FIG.(I.3.1) CALENTADOR SOLAR DE DISEÑO CONVENCIONAL DE FABRICACION COMERCIAL.

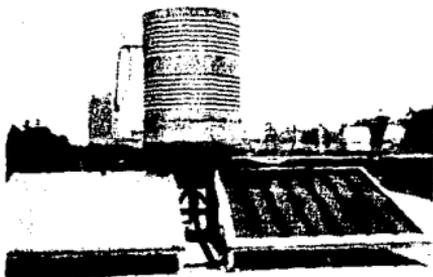


FIG.(I.3.2) CALENTADOR SOLAR CONVENCIONAL PROTOTIPO.

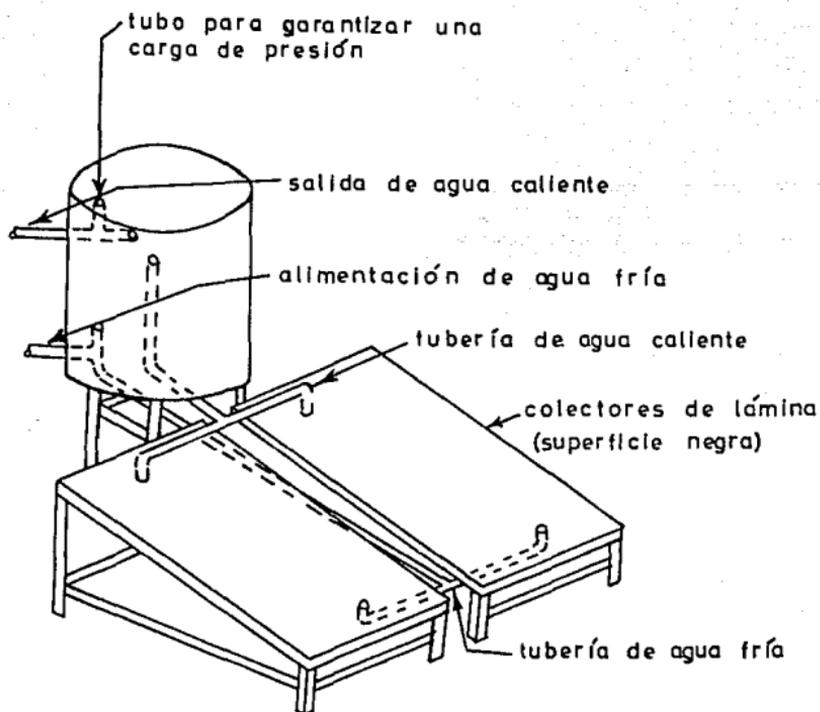


FIG.(I.3.3) CALENTADOR DE AGUA CONVENCIONAL SOLAR

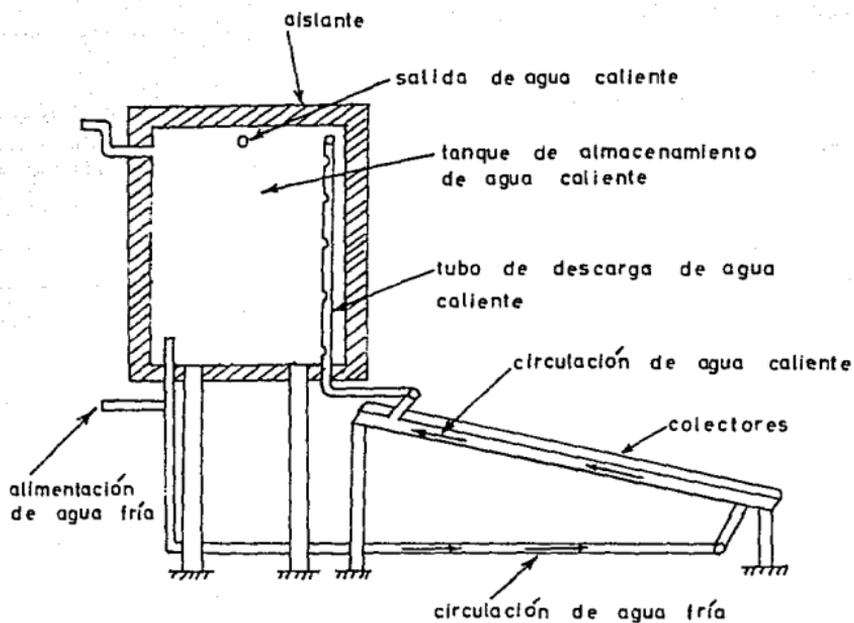


FIG. (I.3.4) VISTA SECCIONAL Y TUBERIAS DEL CALENTADOR SOLAR

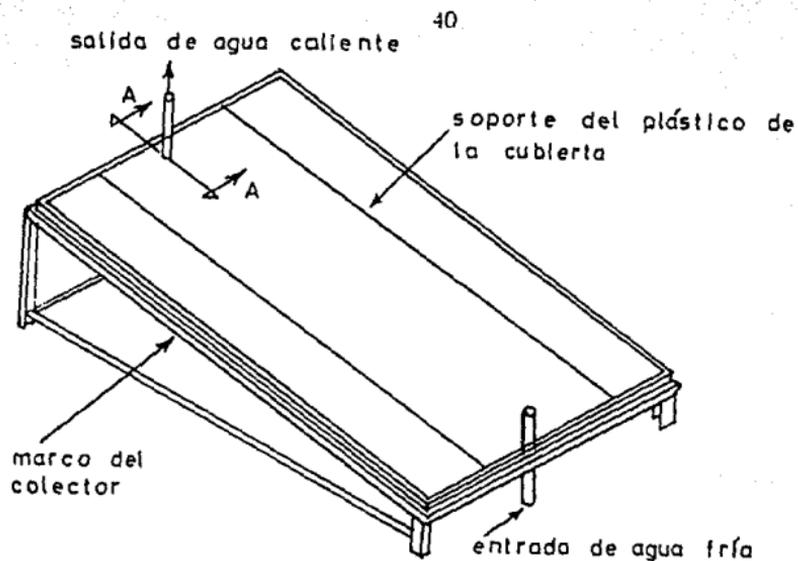
baja del sistema, esto es, en la tubería inferior de agua fría y en la parte inferior del tanque de almacenamiento.

Durante las horas de insolación el agua contenida en el colector se calienta, ascendiendo por convección natural hasta el cabezal del agua caliente. Este la lleva al tanque por medio de un tubo de plástico provisto de perforaciones a varios niveles y permitiendo así que el agua descargue a la altura correspondiente a su densidad (esto es a su temperatura). El colector se reabastece de agua fría tomándola de la parte inferior del tanque de almacenamiento, así en el ciclo de calentamiento se establece una circulación en el aparato, figura 1.3.4, calentando el agua fría del tanque. A este efecto se le da el nombre de termosifón. Durante la noche cuando el agua más fría del sistema es la del colector y la circulación tiende a invertirse, se impide el enfriamiento del agua caliente mediante la perforación del tubo vertical en su nivel más bajo, así la parte del tanque cuya agua llega a enfriarse es mínima, conservándose caliente en la parte superior. En la figura 1.3.5. se muestra un detalle de la construcción de los colectores solares.

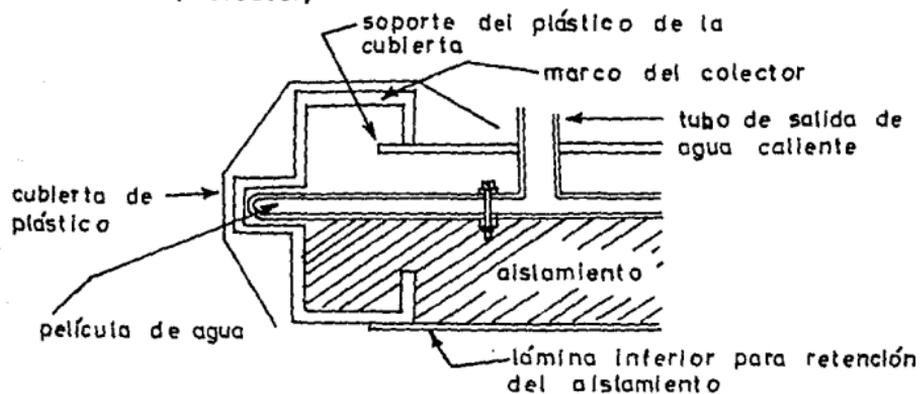
CALENTADOR SOLAR INTEGRAL.

El calentador solar integral minimiza el espacio utilizado por la combinación del colector con su tanque térmico y elimina las tuberías de interconexión. Así, no solo baja el peso y costo del equipo sino también las pérdidas hidráulicas; un prototipo se muestra en la fotografía de la figura 1.3.6.

Un calentador integral consiste de una sola unidad captadora de ener



CALENTADOR DE AGUA
(colector)



VISTA A-A

FIG.(I.3.5) DETALLE DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA

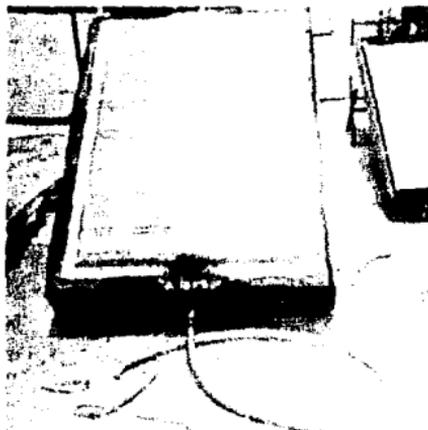


FIG.(I.3.6) PROTOTIPO DE CALENTADOR SOLAR
INTEGRAL DE 120 LITROS DE CAPA -
CIDAD.

gfa solar y a la vez almacenadora de agua caliente. De acuerdo con las ca
 racterfsticas de la radiación solar, la cantidad de agua que un calentador
 puede llevar desde una temperatura inicial hasta una final es proporcional
 al área de captación efectiva. Así, el volumen de agua del tanque de alma
 cenamiento es proporcional a la superficie del colector. La figura 1.3.7.
 muestra esquemáticamente, en un corte longitudinal la construcción y la -
 operación del calentador. La parte 1 de la figura es el tanque de almace
 namiento que puede ser de lámina galvanizada. Los lugares designados -
 con el número 2 están llenos de aislante térmico. La parte 3 es la placa -
 negra del colector recubierta con pintura negra mate; Esta placa, junto --
 con la parte 4 forman una caja hermética para impedir el contacto del agua
 con el aislamiento. Las partes 5 y 6 corresponden a vidrios gruesos y --
 templados para evitar fracturas por choque térmico, 7 y 8 son las tuberías
 de alimentación de agua fría y de descarga de agua caliente respectivamen
 te. La válvula tipo "Check" de la parte 9 impide la circulación inversa del
 agua en la noche, la parte 10 es un difusor que impide que al admitirse ---
 agua fría en el tanque, la turbulencia causada destruya la estratificación -
 térmica.

Durante el día solar la energía radiante que incide sobre la placa -
 negra (parte 3) se transforma en energía térmica y el agua comprendida -
 en las partes 3 y 5 se calienta por conducción y convección. Este volumen
 de agua, al estar más caliente que el agua en el tanque, sufre un empuje -
 hacia arriba, abriendo la válvula (parte 9) y depositándose en la región --
 más alta del sistema, enfrente del tubo de descarga. Este desplazamien-

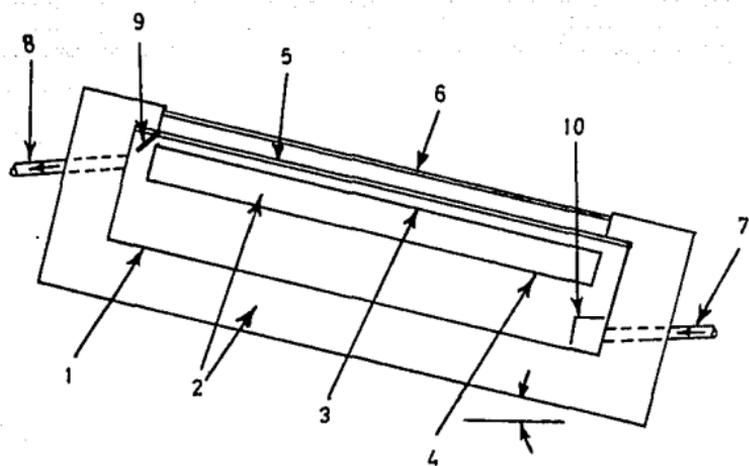


FIG.(I:3.7) DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL FUNCIONAMIENTO-
DEL CALENTADOR SOLAR INTEGRAL.

to requiere que un volumen igual de agua fría abandone el tanque por la parte inferior y penetre en la "Película de calentamiento" (región entre las partes 3 y 5). Se establece así una circulación continua, que permanece -- mientras el sol calienta la placa negra.

En la noche, el fluido permanece estático. Se destaca la pequeña -- fuerza circulatoria, que surge de las diferencias de temperatura en el agua. En la noche, esta diferencia de temperatura se invierte, así que la pequeña fuerza resultante, actuando por detrás de la válvula, debe ser suficiente pa -- ra mantener la hermeticidad de la misma. La dificultad práctica de hacer que la válvula funcione adecuadamente es una deficiencia del diseño, dando como resultado que el equipo sea poco capaz de retener el agua caliente en la noche. Sin embargo, la válvula es irrelevante si se considera que el --- equipo está hecho para proveer de agua entre el ocaso y las primeras horas de la noche.

CALENTAMIENTO HIBRIDO.

Aquí se analiza el aprovechamiento de los calentadores solares en -- la Ciudad de México, donde el calentamiento de agua es técnicamente factible. Debido a la gran variación del clima habrá días consecutivos de pobre insolación y el calentador solar no será suficiente para abastecer de agua en cantidad y a la temperatura deseada, por lo que el calentador solar re-- querirá de una fuente auxiliar de calentamiento para juntos formar una "Ca -- lentador Híbrido doméstico".

El medio auxiliar de calentamiento presenta una gran variedad de -- formas, que podrían ser "de depósito" o "de paso". En función de la factibi -- lidad y precio, será necesariamente eléctrico o de gas.

Descartando la conveniencia de usar calentadores de depósito en serie con calentadores solares, por la ínfima capacidad de retención, quedan así dos alternativas : a) Conectar el calentador solar en serie con un calentador de paso (eléctrico o de gas) ó b) colocar una fuente auxiliar de calor en el tanque de almacenamiento de agua caliente. Enseguida se hace primero, una evaluación de la posibilidad de calentamiento eléctrico y segundo, las alternativas de calentamiento con gas.

CALENTAMIENTO AUXILIAR ELECTRICO.

De acuerdo con lo anterior, se puede instalar una resistencia eléctrica dentro del tanque térmico, o conectar en serie un calentador eléctrico. Esta posibilidad se ilustra en la figura 1.3.8. La resistencia deberá conectarse cuando el agua no alcance una determinada temperatura en el momento de utilización, con las características siguientes:

- a) Capacidad de incrementar la temperatura del volumen de agua en 10°C , en una hora.
- b) Control termostático y de tiempo; podría sugerirse el empleo de una fotocelda para que la resistencia opere en ausencia de determinado nivel de insolación.

El calentador eléctrico de paso debe poder incrementar la temperatura de agua, en al menos, 20°C , en el tiempo que el agua permanece dentro del calentador. Considerando que el gasto de agua será de unos 300 litros/hr. se requerirá una cantidad de unos 7 KW para el calentamiento del agua.

CALENTAMIENTO AUXILIAR POR COMBUSTION.

Los calentadores comerciales de paso, para gas licuado, presentan la alternativa más viable, en apariencia, para proporcionar agua caliente todos los días del año conectados a un calentador solar de agua, según se indica en la fig. 1.3.8., con un costo mínimo de combustible. El calentador se mantiene con un flujo de calor más o menos constante del gas al agua, a partir de un determinado flujo de agua (aprox. 300 Litros/Hr) necesario para operar la válvula de admisión de gas, esta característica se muestra en la Fig. 1.3.9. La figura 1.3.10. muestra como varían los incrementos de temperatura en el agua manteniendo el flujo de gas constante y variando el flujo del agua. Se acepta comúnmente que estos equipos tienen una alta eficiencia térmica, sin embargo el calentador de gas pierde eficiencia cuando se le hace trabajar con bajo flujo de gas.

ANALISIS ECONOMICO.

Actualmente hay pocas razones para que los usuarios de agua caliente abandonen los sistemas tradicionales en favor de los calentadores solares, por lo que los elementos de la toma de decisión deben de ser económicos. La Ingeniería Económica nos proporciona las herramientas de la toma de decisiones para escoger entre alternativas y por lo tanto es necesario definir claramente las alternativas y consecuencias de escoger alguna, hacerlas comparables expresándolas en términos de flujo de dinero, aplicar algún criterio para obtener una base de juicio que justifique la inversión y en base a este criterio seleccionar la alternativa económicamente más atractiva, sin dejar de tomar en cuenta las diferencias entre las -

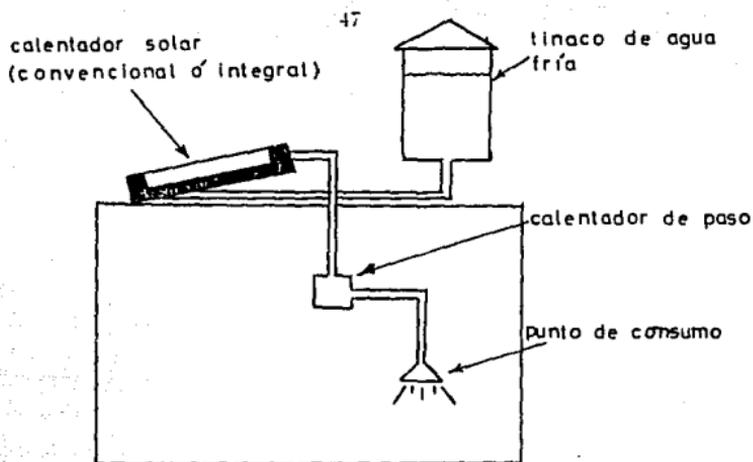


FIG. (I.3.8) DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA CONEXION EN SERIE DE UN CALENTADOR DE PASO Y UN SOLAR - PARA CALENTAMIENTO DE AGUA.

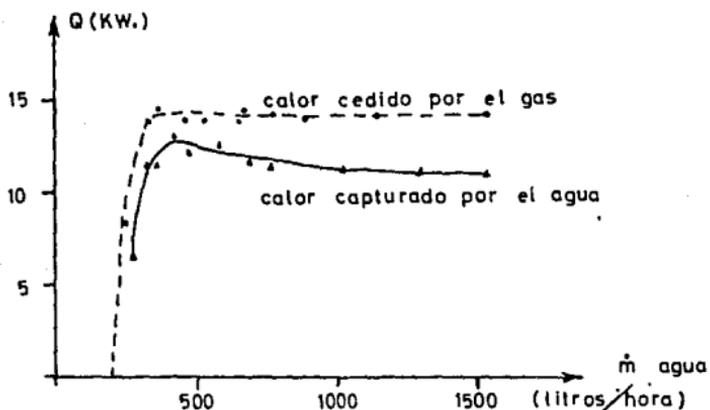


FIG. (I.3.9) CALOR CEDIDO POR EL GAS Y CAPTURADO POR EL AGUA EN UN CALENTADOR COMERCIAL DE GAS, DE PASO.

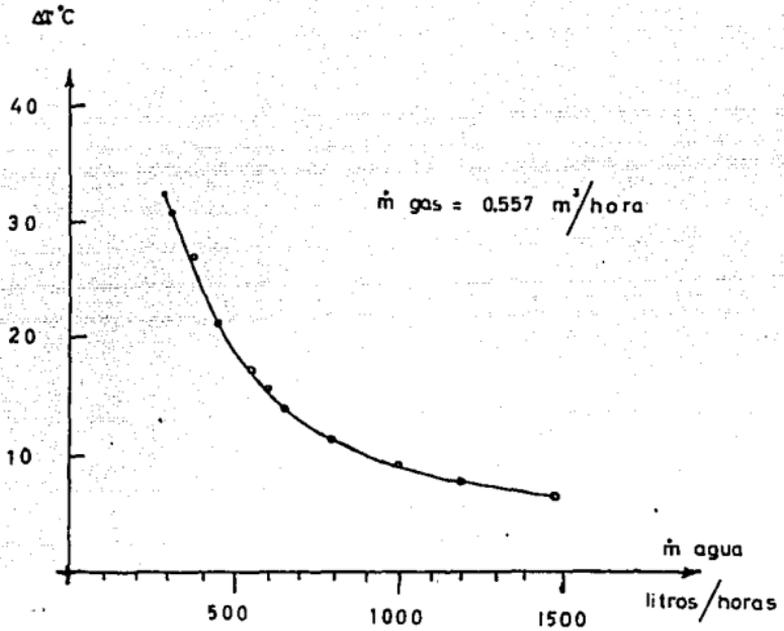


FIG. (I-3-10) DIFERENCIA DE TEMPERATURAS DE ENTRADA Y SALIDA DEL AGUA CONTRA GASTOS PARA CONSUMO DE GAS — CONSTANTE.

alternativas que no pueden expresarse en función del dinero. Como algunas de las más importantes diferencias entre alternativas solares o de combustión, la ventaja económica del calentamiento solar es la que debe promover la tecnología solar. Las bases de costo sobre las que se evalúan las alternativas son las siguientes :

a) Calentador Solar Integral.

Materiales directos.

Tanque térmico, vidrio, marco de montaje, etc. 1,287.00

Mano de Obra

De fabricación y ensamble, 5 horas a

85.00 pesos incluyendo indirectos 425.00

Amortización

De maquinaria e instalaciones 5000 unidades 200.00

Costo Total de Fabricación \$ 1,912.00

Precio de Venta: costo x 1,5 \$ 2,868.00
=====

Dado que el diseño se presta para la producción en serie y con base en la consulta de un fabricante nacional de refrigeradores, se estimó un precio de venta al público de 3,000 pesos suponiendo un volumen de fabricación igual o superior a 1000 unidades mensuales. El mantenimiento, fundamentalmente limpieza interna, sería de unos 400 pesos cada tres años, con una vida útil de 12 años. Los precios aquí anteriormente anotados son con base en los costos nacionales del mercado de proveedores hacia agosto de 1976. La capacidad de estos calentadores es de 200 litros.

b) Calentador Solar Convencional (200 Litros capacidad).

En este diseño se pueden obtener fuertes mejoras en la manufactura modular en serie, por lo que se suponen menores costos y honorarios de mano de obra, pero mayores tiempos de producción que compensados con los materiales requeridos en mayor cantidad, proporcionan un precio aproximado del aparato de 4,000.00 pesos. También se consideran 400.00 pesos de mantenimiento cada tres años.

En virtud de las experiencias de los fabricantes ya establecidos se determina el costo del equipo de una manera más fácil y será como sigue:

Materiales Directos

Tanques, colectores, tuberías, etc.	\$ 2,455.00
-------------------------------------	-------------

Mano de Obra

de Fabricación y de ensamble	360.00
------------------------------	--------

<u>Costo Total de Fabricación</u>	<u>\$ 2,815.00</u>
-----------------------------------	--------------------

Precio de venta : costo x 1.4	\$ 3,941.00
-------------------------------	-------------

c) Calentador Auxiliar para Sistema híbrido a base de agua.

Este equipo se considera con un costo inicial total de 750 pesos y mantenimiento de 100 pesos cada dos años, vida útil de 15 años y costos de operación (combustible) para calentar agua de 45 ° C a 60 ° C. (caso más desfavorable) de \$32.00 cada mes, en combinación con el calentador convencional, o \$93.00 (AT = 15 ° C) conectándose en serie con el calentador integral.

COMPARACION DE ALTERNATIVAS

Las alternativas se hacen equivalentes para efectos de comparación a lo largo de un período de 15 años, suponiendo que a los 12 años se reemplazan los calentadores solares por otros nuevos, y que en los primeros -- tres años de estos se paga una parte proporcional (25%) del valor total. -- Los pagos anuales en alternativas equivalentes (calentador de gas de paso, de depóstico, integral híbrido y convencional híbrido) se presentan en forma acumulada en la Fig. 1.3.1.1. Se comparan también con los costos de operación de los calentadores solares sin calentamiento auxiliar. Los puntos de intersección en la gráfica, de las alternativas solares con las de combustión de gas, suceden siempre antes del segundo año, e indican que en poco tiempo de operación el calentador solar se amortiza.

Con los datos anteriores se hace una comparación económica entre alternativas iguales, por los dos métodos de costo anual y valor presente en la ~~tabla~~ No. 1.3.1.

Aunque no se analizó en el presente estudio el calentamiento híbrido Solar-eléctrico, se ha comprobado que este calentamiento presenta las mí mas tendencias y conclusiones que el calentamiento híbrido solar-gas.

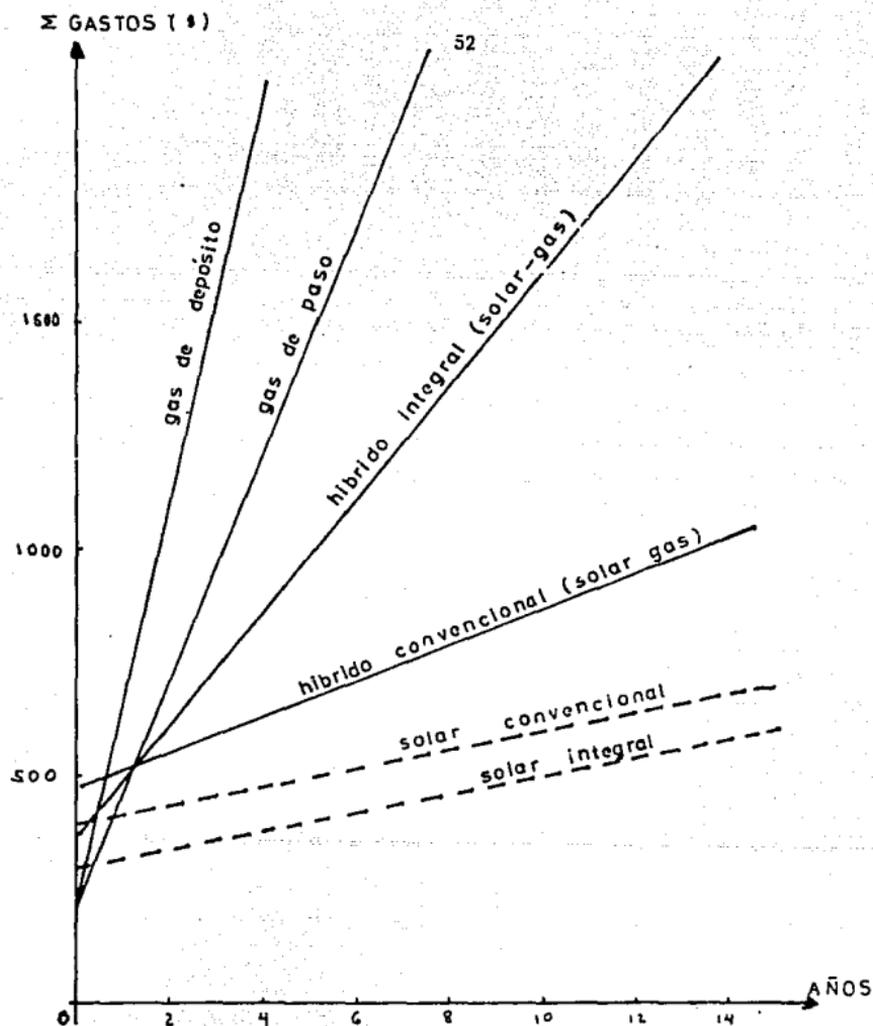


FIG.(I.3.11) GASTOS ANUALES ACUMULADOS DE LAS ALTERNATIVAS SOLAR GAS Y GAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA. ($\Delta T=35^{\circ}\text{C}$ 200 litros/día DF)

TABLA 1.3.1.

CALENTADOR HIBRIDO SOLAR-GAS

ALTERNATIVA	COSTO ANUAL (15 años)	VALOR PRESENTE (15 años)
Calentador Integral Solar	\$ 736.40	\$ 3,443
Calentador Convencional Solar.	950.25	4,443
Calentador de Gas de Paso	3,081.60	14,048
Calentador de Gas de depósito	4,933.35	23,066
Calentador auxiliar de Gas (para Integral)	1,219.55	5,702
Calentador auxiliar de Gas (para convencional)	543.45	2,541
Híbrido Integral (Solar -gas)	1,995.05	9,328
Híbrido convencional (Solar - gas)	1,544.45	7,221

1. 4.

**REFRIGERACION Y CALEFACCION
DE EDIFICIOS.**

El uso de los sistemas de calefacción y refrigeración es de suma importancia ya que por medio de ello se pueden lograr condiciones de temperatura adecuadas en las oficinas, talleres, almacenes, etc., y temperaturas apropiadas para la conservación de comestibles.

Estos elementos actualmente funcionan utilizando la energía eléctrica y los combustibles fósiles mientras que el aprovechamiento de la energía solar está en etapa de estudio, pero en el futuro será de capital importancia.

1.4.a. REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPORES.

El procedimiento más común para proporcionar refrigeración es por medio del sistema de compresión de vapores. El ciclo se representa en la Fig. 1.4.1. y la Fig. 1.4.2. muestra el mismo sistema en el plano sT (entropía-temperatura). Los procesos que se presentan en el sistema son adiabáticos excepto los del evaporador y condensador. El ciclo se inicia en el estado (1) donde los vapores del refrigerante entran en el compresor que puede ser una máquina rotativa o una de movimiento alternativo. La temperatura del refrigerante es baja y como la compresión es adiabática, la salida del compresor (2) se tiene una presión tal que la temperatura de saturación correspondiente a esta presión es mayor que la normal de la fuente fría. Sale el vapor del compresor y entra al condensador donde el calor de saturación es extraído por el agua en circulación. Sale el líquido del condensador (3) y entra en una válvula de expansión, que es una válvula de estrangulamiento que separa la región de alta presión de la de baja. En (4) la mezcla húmeda entra en el evapora-

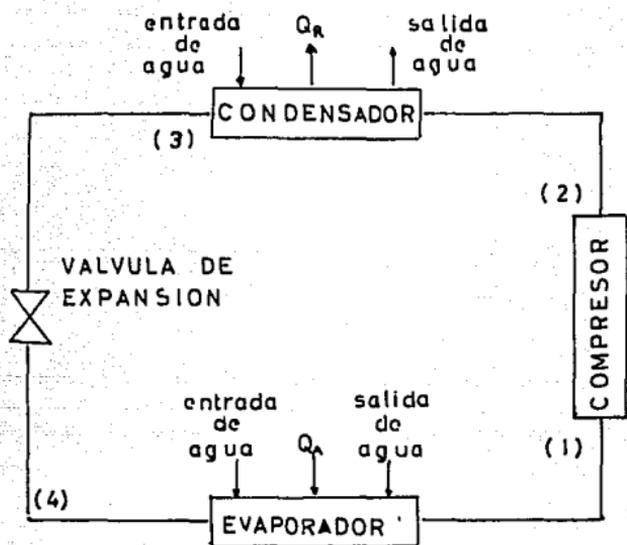


FIG.(I.4.1) SISTEMA DE COMPRESION DE VAPOR

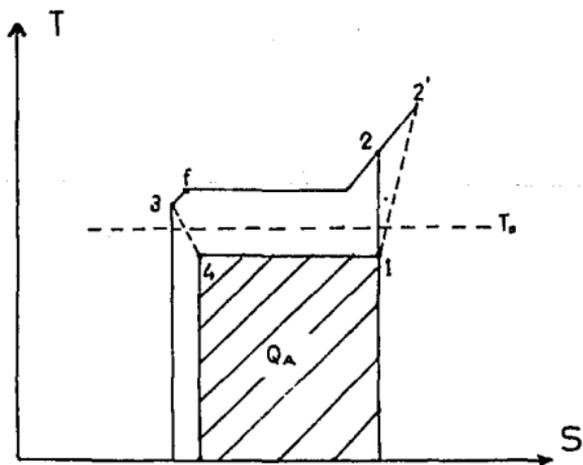


FIG.(I.4.2) CICLO DE REFRIGERACION PLANO (s-T)

dor absorbiendo el calor Q_a del ambiente circundante que puede ser el -- del espacio frío o el interior de un refrigerador. Repitiéndose el ciclo -- nuevamente.

En la fabricación comercial de hielo se hace circular salmuera alrededor de los moldes que contienen agua absorbiendo el calor de ésta para congelarla. La salmuera circula después por el evaporador para ser enfriada nuevamente y de ahí retorna para absorber más calor de los moldes. Cuando lo que se quiere es enfriar aire éste circula alrededor de las serpentines del evaporador.

Para que una sustancia trabaje como refrigerante debe tener baja presión de saturación a las temperaturas normales de trabajo no debe ser tóxico, debe ser económico, tener buena conductividad térmica, baja viscosidad y encontrarse fácilmente en el mercado.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR EN UN SISTEMA DE REFRIGERACION POR COMPRESION.

La energía solar es captada por un colector que calienta un fluido de trabajo, y que hace evaporar agua por medio de un cambiador de calor, que hace funcionar una turbina que aporta el trabajo necesario para hacer posible la refrigeración por medio de un sistema convencional por compresión. Dicho sistema se muestra en la Figura 1.4.3.

El sistema consta de tres fluidos en ciclos cerrados que son:

- 1.- Ciclo de captación, está formado por un colector, cambiador de calor y bomba.

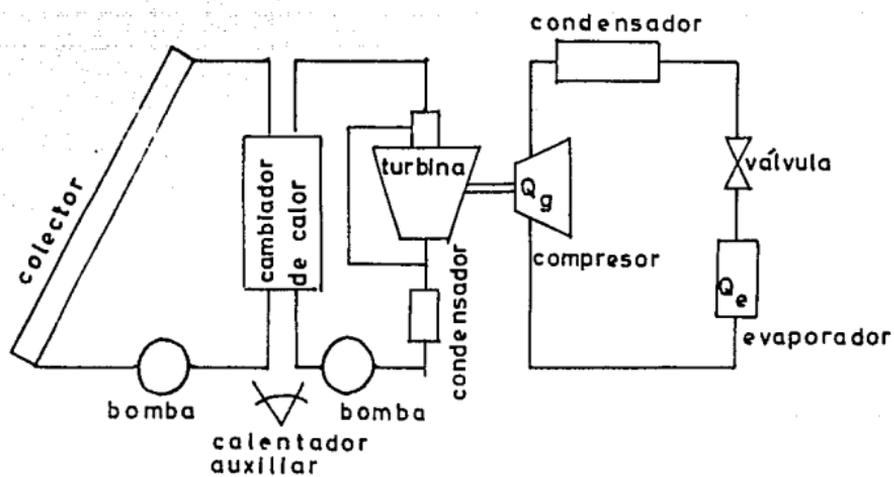


FIG.(I.4.3) SISTEMA DE REFRIGERACION APROVECHANDO LA ENERGIA SOLAR

2. - Ciclo de potencia que consiste en un cambiador de calor, - bomba, condensador y la turbina.
3. - Ciclo de enfriamiento consta de compresor, condensador evaporador y válvula.

El ciclo de enfriamiento por compresión ya ha sido descrito en el apartado anterior y los ciclos de captación y potencia serán tratados con más detalle en el apartado de generación de energía eléctrica.

Las figuras 1.4.4 y 1.4.5 muestran las características de los ciclos, donde se ve la eficiencia contra la temperatura del ciclo captación-potencia y el coeficiente de rendimiento contra la temperatura de condensación del ciclo de enfriamiento.

1.4.b. SISTEMA DE REFRIGERACION POR ABSORCION

El sistema de refrigeración por absorción se muestra en la Figura 1.4.6. y consta de generador, rectificador, condensador, evaporador y absorbedor. En el generador se encuentra una solución formada por un absorbente y un refrigerante (solución fuerte) que pueden ser agua y amoníaco respectivamente.

Para suministrar la energía calorífica necesaria al generador, se puede aprovechar la energía solar captada por colectores solares. En el generador se calienta la solución donde el refrigerante por tener menor punto de temperatura de evaporación, es separado y con convección pasa al rectificador donde se elimina el agua que pueda llevar. El vapor del refrigerante pasa al condensador donde cede calor para ser condensado y ya en forma líquida pasa a la válvula de expansión. Cuando el líquido se encuen-

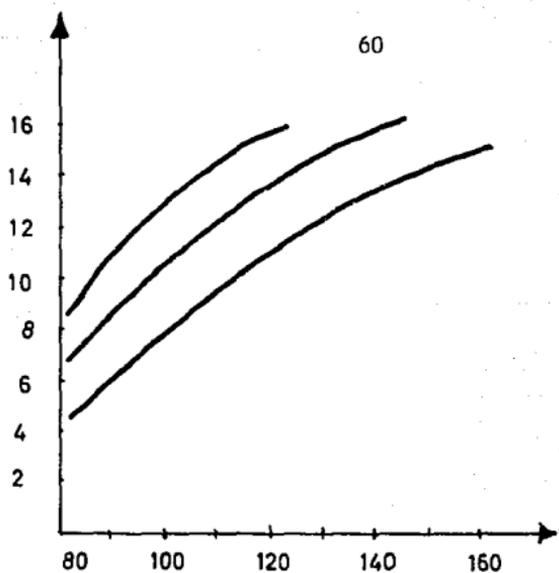


FIG. (I.4.4) EFICIENCIA DEL CICLO DE POTENCIA

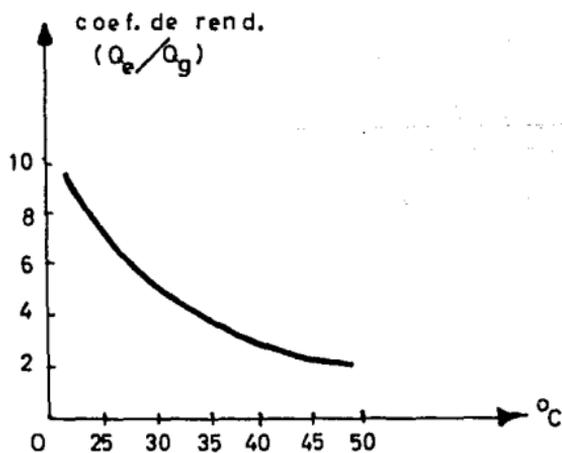


FIG. (I.4.5) RENDIMIENTO DEL CICLO DE ENFRIAMIENTO

tra en la región de baja presión se expande formando un gas muy húmedo y a una temperatura muy baja, por lo que estando en el evaporador absorbe calor del medio. El agua que formaba parte de la mezcla fuerte (absorbente) para al absorbedor, pundo donde el refrigerante es mezclado con el --- agua y llevado al generador por medio de una bomba para repetir el ciclo.

1.4.c. SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.

En los sistemas de aire acondicionado diseñados para aprovechar la energía solar, al igual que en los sistemas de refrigeración, se utiliza una mezcla de una sustancia refrigerante y una absorbente, que pueden ser: amoníaco-agua o agua bromuro de litio, entre otros. La Fig. 1.4.7. muestra un diagrama del sistema, donde se puede observar que el aire frío se obtiene al hacerlo circular por el evaporador donde se encuentra el refrigerante en condiciones de absorber el calor. Para poder llevar a cabo el funcionamiento del sistema se requiere una temperatura de colección de 99°C , que es posible tenerla por medio de colectores planos de dos o tres cubiertas de vidrio, de manera que contando con las pérdidas de calor por la conducción del agua del colector al generador, se puedan disponer de 82°C .

1.4.d. SISTEMAS SOLARES DE CALEFACCION Y REFRIGERACION

Económicamente es mejor usar un sistema combinado de calefacción y refrigeración que uno que realice las funciones por separado. El costo de los colectores varía según el tipo. Estos pueden ser justificados más fácilmente cuando los colectores se usan todo el año que cuando operan solamente durante los meses de invierno o de verano.

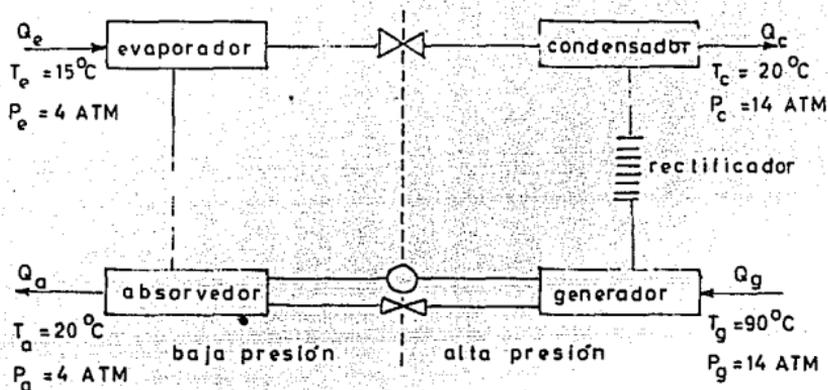


FIG.(I.4.6) SISTEMA DE REFRIGERACION POR ABSORCION

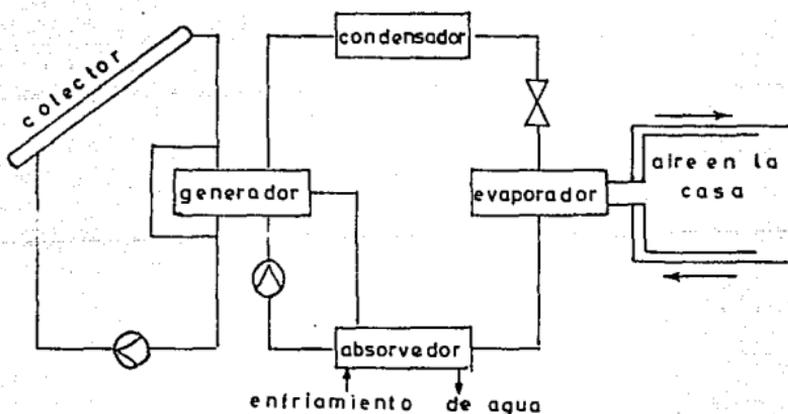


FIG (I.4.7) SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.

Se han desarrollado varios sistemas para cumplir con ambas funciones y el más simple es el de la casa Hay Skytherm. Esta tiene una azotea cubierta con una capa de agua para coleccionar la radiación solar durante el invierno y para rechazar la acumulación del calor en el verano por evaporación y radiación.

Otro sistema se muestra en la Fig. 1.4.8 que tiene un colector de doble vidrio que mantendrá el agua caliente en un sistema de almacenamiento a la temperatura lo más alta posible. El suministro doméstico de agua caliente puede ser obtenido por medio de un serpentín montado en el tanque. El agua del sistema de almacenamiento es impulsada por medio de una bomba a través de un calentador auxiliar hacia una válvula que dirigirá el fluido a un sistema de calefacción o una unidad de absorción de aire acondicionado según se requiera.

El uso del sistema descrito implica que las casas y edificios tengan condiciones arquitectónicas especiales, como son contar con aislamientos adecuados para minimizar las pérdidas de calor en invierno y aumentar la correcta orientación del edificio con la distribución adecuada de las ventanas.

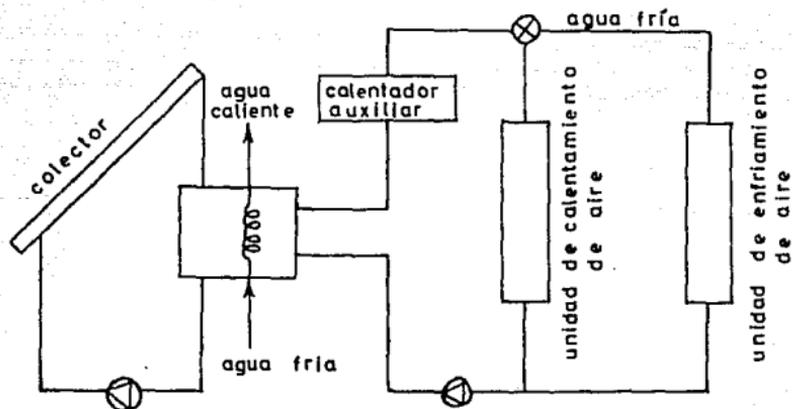


FIG.(I.4.8) SISTEMA DE CALEFACCION Y REFRIGERACION.

1.5.

GENERACION DE ELECTRICIDAD

GENERACION DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO UN CICLO TERMODINAMICO.

A pesar del considerable esfuerzo empleado en la investigación de la energía solar durante los últimos 25 años, las aplicaciones de ésta para la producción de potencia eléctrica de bajo costo no ha tenido éxito. Las razones de la falta de éxito pueden resumirse en un hecho básico: el no poder competir económicamente con los sistemas de energía convencionales y nucleares. Los factores que contribuyen a este hecho se mencionan a continuación:

1. - La inversión inicial es muy alta.
2. - El mantenimiento de los colectores de energía es costoso.
3. - La baja eficiencia de la conversión debida a las bajas temperaturas de operación.
4. - Las pérdidas caloríficas dentro del sistema.
5. - La degradación de los espejos y lentes con el polvo y con el tiempo.
6. - Los problemas no resueltos de almacenamiento de la energía para períodos nocturnos y nublados.

La conversión térmica de la energía tropieza con un conflicto básico entre el principio de Carnot y los mecanismos de pérdida de energía.

El principio de Carnot establece que, para alcanzar el máximo de rendimiento de trabajo de una cantidad dada de calor, debemos tener la más alta temperatura de trabajo posible. Por otro lado, todos los mecanismos de pérdida de calor también aumentan con temperaturas altas -

de trabajo. Como consecuencia, para hacer máxima la eficiencia neta de conversión de la energía solar en trabajo, debemos simultáneamente elevar las temperaturas y hacer mínimas las pérdidas caloríficas. Es fácil reducir las pérdidas por conducción y convección, haciendo mínimas las secciones transversales de las estructuras de soporte y evacuando el - - aire en la vecindad de la superficie absorbente. Las pérdidas por radiación son más difíciles de controlar, puesto que se necesita una superfi - cie absorbente que a la vez que absorba la energía solar impida la emi - sión de calor. Esto se logra con mayor eficiencia utilizando las superfi - cles selectivas en los medios de captación.

Las diferencias fundamentales entre los sistemas que aprovechan la energía del sol para transformarla a energía mecánica y de esta a - - eléctrica se encuentra en la forma en que estos captan dicha energía y - en el tipo de fluido de trabajo que usan. De acuerdo a la forma en que es - tos sistemas captan la energía solar podemos considerar dos tipos de - aprovechamiento, a saber: El sistema de receptor central y el sistema - de colector distribuido.

El sistema de receptor central se muestra en las Figs. 1.5.1. y 1.5.2. Este concepto involucra una gran variedad de aprovechamiento - que usan diferentes tipos de reflectores, receptores y fluidos de trabajo. En estos sistemas los espejos reflejan directamente los rayos del sol a - una central de absorción de calor localizada en una torre alta.

El sistema de colector distribuido se muestra en la Fig. 1.5.3. - en la fig. 1.5.4 se puede apreciar como se vería un campo de colectores

FIG. 1.5.1 Concepto de una Torre Receptora

CAPACIDAD	215 MW(e)
PROM. SOBRE 4000 HRS	147 MW(e)
ALTURA DE LA TORRE	1500 ft (457.5 m)

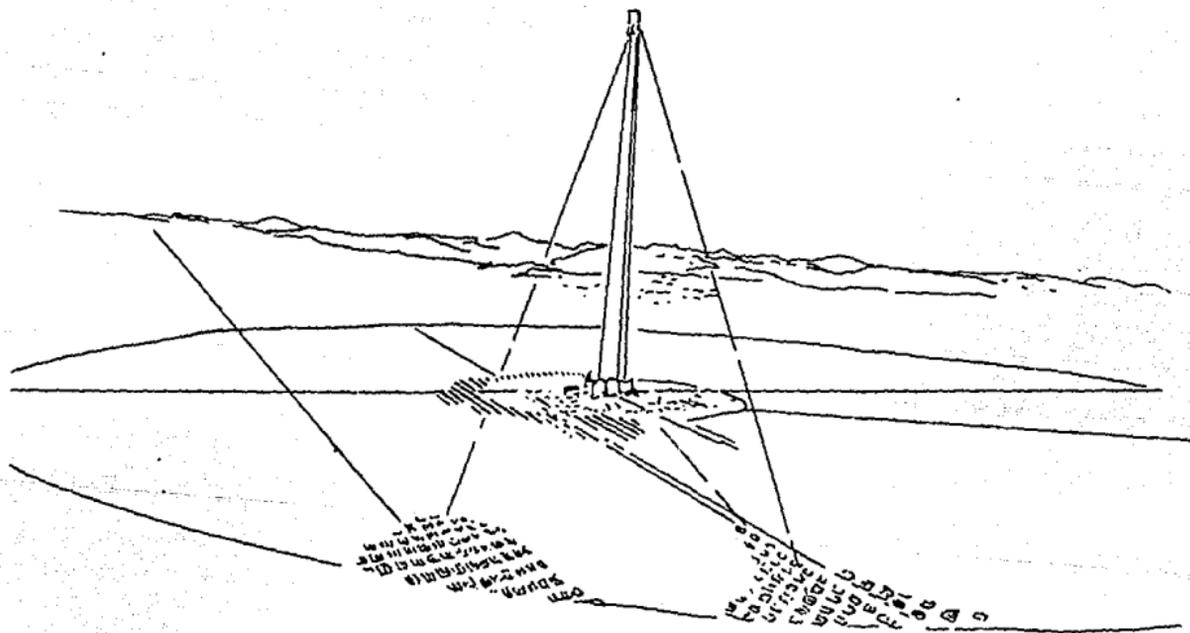
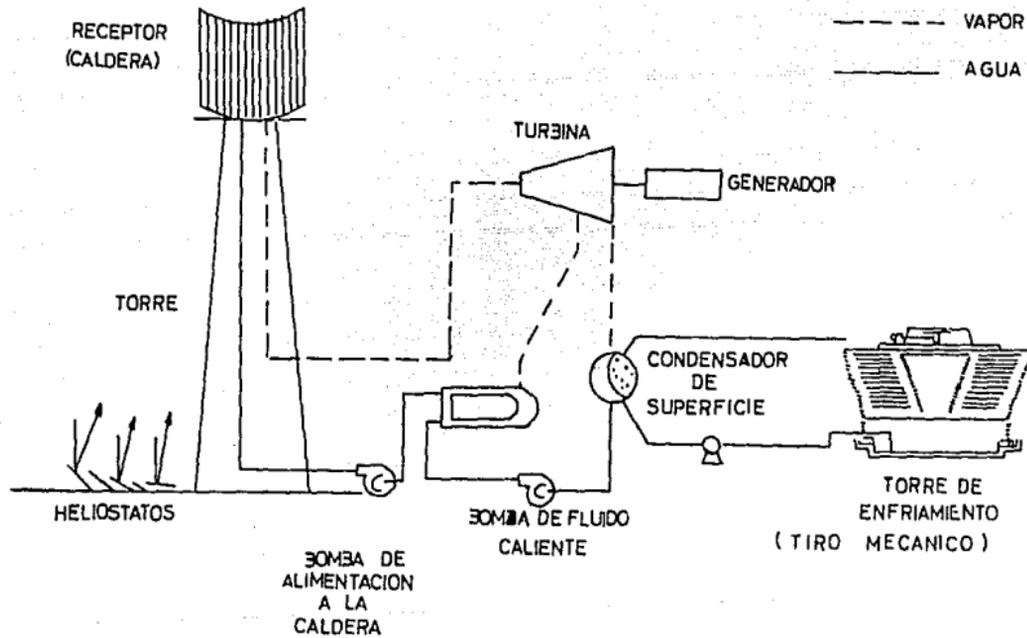


FIG. 1.5.2. Sistema de Generación con Receptor Central



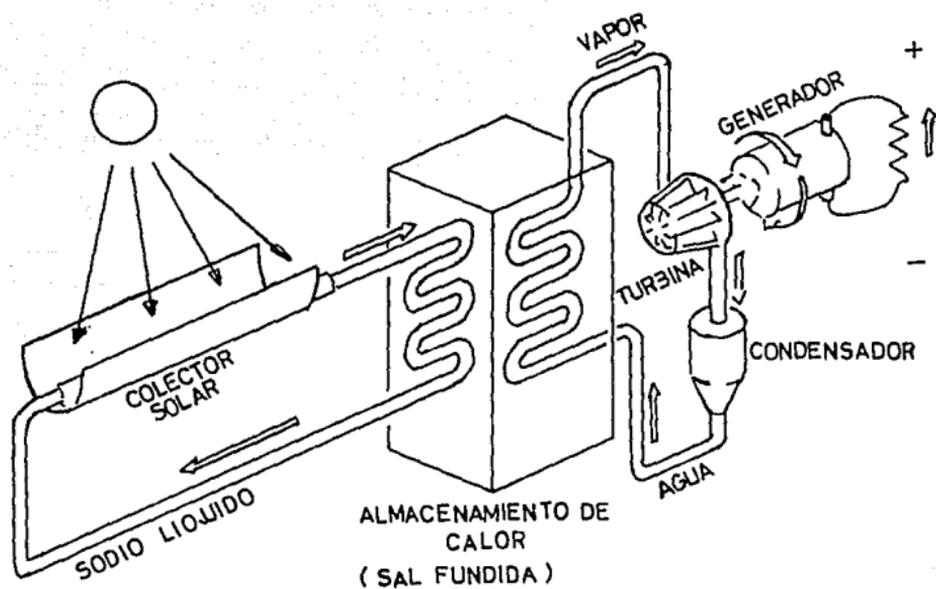


FIG.1.5.3. Sistema de Potencia Solar de Conversión Térmica

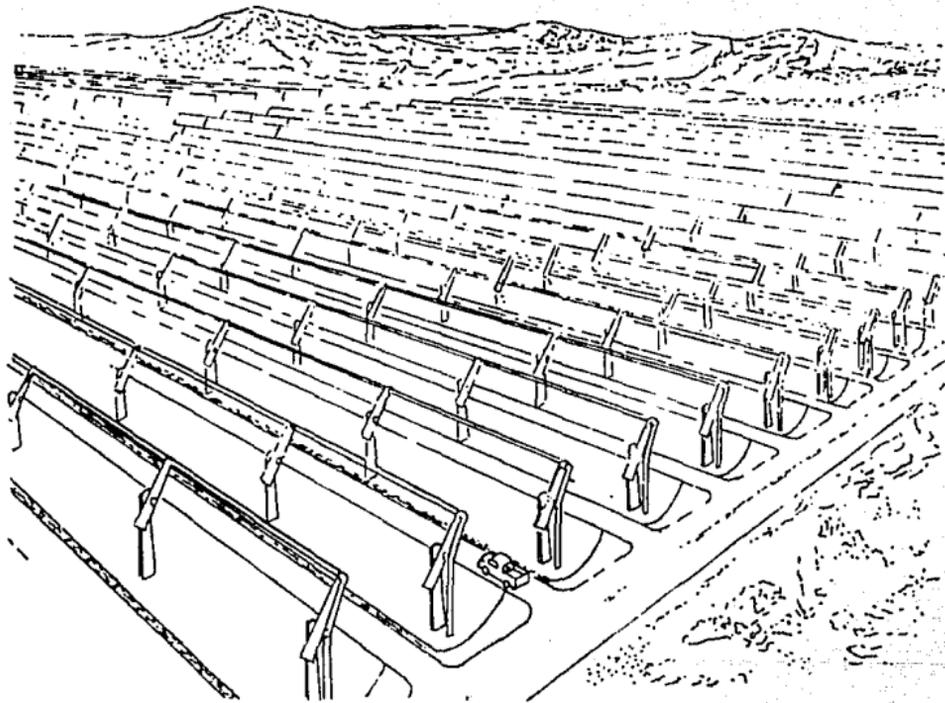


FIG.1.5.4. Concepto Artístico de los Concentradores Solares de Espejo-Fijo que muestra los Espejos y los Tubos Absorbedores de Calor

para un sistema de este tipo. Un sistema de colector distribuido utilizará la sal fundida como medio para almacenar la energía térmica. Desafortunadamente se requerirán grandes cantidades de sal, ya que un día de almacenamiento necesitará 454 000Kg/MW, lo cual conduce a costos muy elevados. La fig. 1.5.5. muestra una gráfica de costos contra capacidad de almacenamiento y tamaño del campo colector.

La razón por la que se busca optimizar el tamaño del campo colector se debe a que en cuanto este se vuelve mayor, los diámetros y las longitudes de la tubería requerida aumentan. El tamaño óptimo del campo es de 6 a 7 Km². para plantas con capacidades de 100 MW.

De los sistemas ya llevados a la práctica la mayoría utilizan colectores de concentración por obtener mayores temperaturas en el fluido de trabajo.

Existen proyectos llevados a cabo por la Universidad de Arizona y el Centro de Investigaciones de Minneapolis, Minesota, que tratan de aprovechar el medio de captación de la energía solar con superficies selectivas, empleando un campo de heliostatos (Ver figs. 1.2.3., 1.5.1. y 2.5.2.) para dirigir los rayos del sol a un receptor central.

Los fluidos que se utilizan generalmente como medio de transporte de energía son el agua, el freón y el sodio líquido. El aprovechamiento de estos puede ser de las siguientes maneras: El fluido de trabajo de baja presión es sobrecalentado por el sistema de captación de la energía solar, y este a su vez sobrecalienta el fluido de trabajo de alta presión por medio de un intercambiador de calor produciéndose vapor que mueve

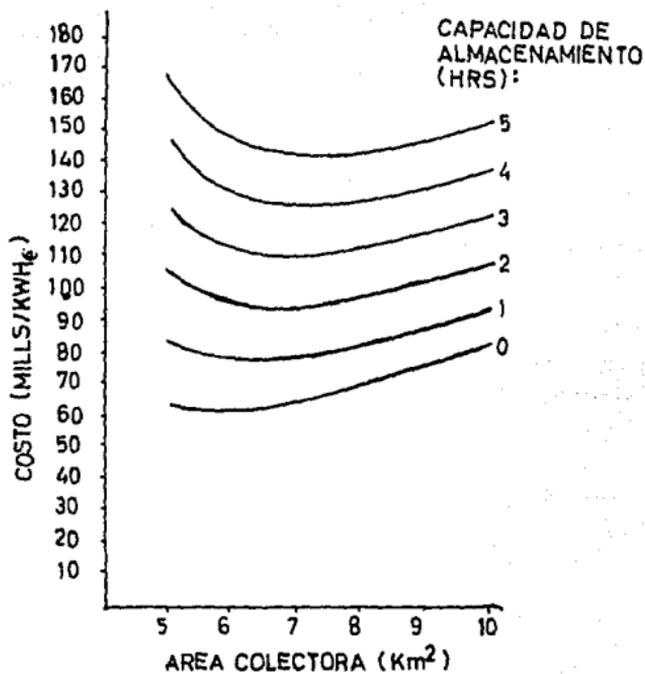


FIG.1,5,5. COSTOS DE GENERACION PARA UN SISTEMA COLECTOR CONCAVO Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA CALIENTE

una turbina la cual puede estar acoplada a una bomba de agua, a un compresor ó a un generador. También se puede producir vapor de agua directamente del medio de captación y con este mover la turbina. La elección de los diferentes fluidos de trabajo a utilizar depende de las características de los sistemas en estudio, sin olvidar las temperaturas de cambio de fase de cada uno de estos.

A continuación se hará la descripción de un sistema de generación de electricidad, el cual utiliza como medio de captación colectores de enfque con superficies selectivas, además consta de un sistema de almacenamiento de energía para poder suministrar potencia eléctrica en días nublados y durante la noche.

SISTEMA DE GENERACION. - El hecho de utilizar superficies selectivas nos cambia los puntos (3) y (4) anteriormente mencionados (ó sea el de la baja eficiencia debido a las bajas temperaturas y el de las pérdidas caloríficas) y ofrece la posibilidad de rendir eficiencias, totales más altas de conversión. La temperatura de operación de 540°C usada actualmente en procedimientos convencionales, parece asequible.

Para lograr un sistema práctico de potencia se requiere alguna forma de almacenar toda la energía recibida y de permitir su uso al ritmo actual de demanda impuesto al servicio público.

DESCRIPCION DEL SISTEMA.

El sistema propuesto se muestra en la fig. 1.5.3. La parte del lado izquierdo es el subsistema que suministra la energía. La parte del

lado derecho es el subsistema de conversión de energía y la parte central es el subsistema de almacenamiento y transferencia.

SUBSISTEMA DE ABASTECIMIENTO.

El grupo de colectores solares está provisto de un sistema de tuberías por el que circula un líquido el cual sirve para extraer el calor de los colectores y transferirlo al subsistema de almacenamiento. El metal líquido entraría al grupo de colectores a una baja temperatura, determinada por las temperaturas del condensador y la turbina de vapor y saldría a una alta temperatura de 54°C ó más, valor cercano a la temperatura de entrada de las turbinas convencionales de vapor. Mucha de la tecnología nuclear básica para el manejo del metal líquido sería aplicable y tendría menos complicaciones puesto que el metal líquido no sería radiactivo.

SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO. -

El subsistema de almacenamiento térmico es un gran tanque, probablemente enterrado en el subsuelo, conteniendo un material cuyo punto de fusión es aproximadamente igual a la temperatura de operación de la turbina. Hay disponibles varias sales y metales que tienen puntos de fusión muy bajos. La selección exacta depende tanto de la temperatura deseada como de su costo y propiedades físicas de manejo. El circuito del metal líquido del subsistema de abastecimiento pasa a través del medio de almacenamiento y transforma una porción de dicho material a la fase líquida.

La forma del tanque es opcional puesto que se le puede proporcionar adecuado aislamiento térmico a bajo costo, para hacer el tiempo de relajación térmica de varias semanas ó meses, por lo tanto, la forma puede determinarse por conveniencia constructiva, ya sea como un cilindro con la zona más caliente en el centro ó un rectángulo con la zona caliente en uno de sus extremos ó en la región central. La parte superior del tanque deberá flotar libremente, puesto que el material en fusión cambiará en general el volúmen cuando cambie de fase.

SUBSISTEMA DE CONVERSION. -

El subsistema de conversión consiste del circuito de vapor a alta presión, la turbina; el generador, el intercambiador, el condensador para el calor de desecho y las bombas. El fluido de trabajo a presión se inyecta en la caldera del subsistema de almacenamiento, en donde se vaporiza. El vapor se sobrecalienta en ésta etapa y se lleva hacia la turbina.

El fluido del subsistema de conversión entra al subsistema de almacenamiento térmico a una temperatura baja y sale a una temperatura cercana a la del fluido de trabajo del subsistema de abastecimiento. Enseguida se muestran los parámetros y costos del sistema descrito, el cual está en proyecto en la Universidad de Arizona, así como los costos de la planta ya en operación de San Luis de la Paz, Guanajuato, que utiliza un sistema de captación por medio de superficies selectivas, como medio para el almacenamiento de energía, un acumulador de vapor y como fluido de trabajo el Freon II.

SISTEMA DESCRITO.

EFICIENCIAS.

Potencia Solar promedio en el desierto		0.8 KW/m ²
PERDIDAS POR ABSORCION AL NIVEL DEL MAR	75%	
CALOR DE ENTRADA		0.6 KW/m ²
EFICIENCIA DE CARNOT	55%	
EFICIENCIA DE LA TURBINA	75%	
ENERGIA UTILIZADA		0.250 KW/m ²
EFICIENCIA TOTAL	31%	

COSTO DEL SISTEMA

Absorbente	15.6 Kg/m ²	13.8 dolares
Cubierta (vidrio)	34.3 "	7.9 "
Películas	- -	2.1 "
Tubería	15.0	13.9 "
Soporte estructural	25.0	11.2 "
Colectores de calor	17.1	6.8 "
Almacenador térmico	19.9 "	2.2 "
Terreno	- -	2.2 "
Mano de obra	- -	20.0 "

COSTO POR METRO CUADRADO 80.1 dolares

Amortización a 10 años (5%)

Costo de la energía (0-10 años) 1.80 cts. dolar/KWH

Vida media antes de descomponerse 40 años

Costo de la energía (10-40 años)	0.06 cts. dolar/KWH
Costo promedio de la energía	0.50 cts. dolar/KWH

AREA NECESARIA

POTENCIA INSTALADA DE "250 MW"

Área colectora	$3.4 \times 10^6 \text{ m}^2$
Terreno necesario (área)	$9.0 \times 10^6 \text{ m}^2$
Dimensiones	3 Km X 3 Km

POTENCIA INSTALADA DE "1 000 MW"

Área colectora	$14 \times 10^6 \text{ m}^2$
Terreno necesario (área)	$36 \times 10^6 \text{ m}^2$
Dimensiones	6 Km x 6 Km

SAN LUIS DE LA PAZ GUANAJUATO

Costo de la turbina solar de 30 KW.	312,000.00 dls.
Costo del KW instalado	10,400.00 dls.
Anualidad de la inversión	37,440.00 dls.
(vida infinita, 12% tasa de descuento)	
Costo anual de operación	1,200.00 dls.
COSTO TOTAL ANUAL	
Generación bruta (media anual)	72,270 KWH
Generación neta (media anual)	61,320 KWH
Costo medio del KWH bruto	0.5344 dls.
Costo medio del KWH neto	0.6304 dls.

Costo del KWH considerando los
gastos de operación

0.0168 dls.

Costo del KWH neto considerando los
costos de operación

0.0192 dls.

Como es prácticamente imposible llevar a cabo el ciclo de Carnot (que sirve como guía para poder estimar eficiencias), el ciclo utilizado por la mayoría de los sistemas es el ciclo Rankine por los buenos resultados que se han obtenido, o sea con intervalos de temperatura menores para una misma eficiencia en comparación con los otros ciclos termodinámicos.

I. 5. b. GENERACION DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO CEL - - DAS FOTOVOLTAICAS.

La conversión directa de energía solar en energía eléctrica, mediante el uso de semiconductores, se denomina técnicamente conversión fotovoltaica, mientras que a los dispositivos de conversión se les llama celdas fotovoltaicas, fotopilas o celdas solares.

La tecnología que se usa actualmente es a base de uniones p-n de silicio, aunque muchas técnicas, estructuras y materiales alternativos se están desarrollando en los laboratorios y son: heterouniones sulfuro de Cadmio-sulfuro Cuproso, óxido de Cadmio $CdS-Cu_2S$ y CdO estructuras shottky y óxidos semiconductores.

El principio de la conversión fotovoltaica se puede explicar por medio del efecto fotovoltaico.

ESTA TERCERA COPIA
SALIR LA LA
0.0168 dls.
0.0192 dls.

Como se mencionó antes, normalmente las celdas solares están compuestas de uniones p-n de semiconductores, a las cuales se les conectan electrodos, dejándose abiertos como se ve en la fig. 1.5.6. Cuando la luz incide sobre la región p, el fotón incidente es absorbido por un electrón, el cual pasa a la valencia de conducción y se desplaza hacia la región N. Similarmente un hueco, al absorber un fotón, se desplaza hacia la región P. Esta separación de cargas crea un campo eléctrico opuesto al campo eléctrico debido a la región de carga espacial. Si la iluminación es intensa y por lo tanto el número de fotones absorbidos es grande, estos dos campos se cancelan uno al otro, provocando un voltaje a circuito abierto que se puede medir en los electrodos.

La ecuación que rige el voltaje a circuito abierto es:

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln \frac{J_s}{J_0}$$

Las constantes son: K= cte. de Boltzman
T= grados Kelvin
e= carga del electrón

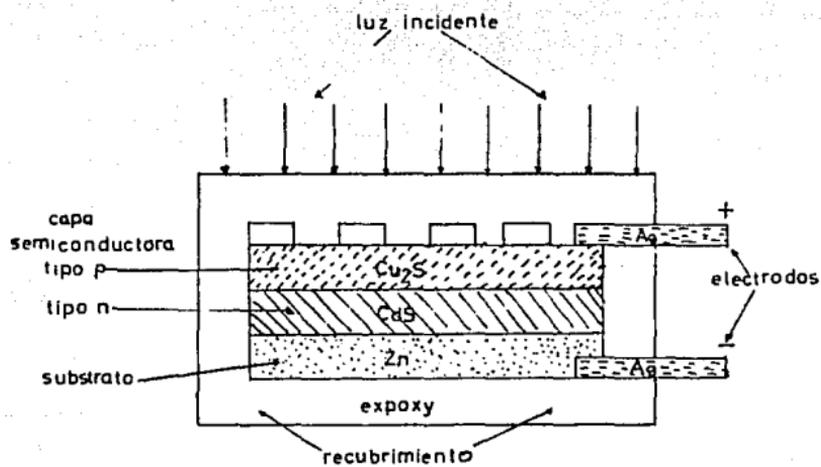
$J_s = Kn(h)$ = corriente proporcional a la intensidad de la luz donde $n(h)$ es el número efectivo de fotones que inciden en la celda, K es el factor de eficiencia para la producción de pares (electrón-hueco).

Esta corriente la podemos medir por medio de un amperímetro, corto circuitando los electrodos.

Si medimos la corriente total que pasa por una resistencia de carga conectada entre los electrodos tendríamos.

$$J = J_s - J_0 (\exp. eV/KT - 1)$$

FIG. (15.6)



donde J_0 (exp. $eV/KT - 1$) es la corriente en sentido contrario a J_g debida a la tensión efectiva de la unión.

La curva característica de la unión p-n se ve en la fig. I. 5. 7, cuya zona de operación para la fotocelda se muestra invertida en la fig. I. - 5. 8.

COSTOS.

La tecnología para el desarrollo y construcción de celdas solares actualmente es muy cara, razón que ha impedido la producción en gran - escala de energía eléctrica. En la tabla I. 5. 1. se muestra el costo de producción, material, eficiencia, medio ambiente en que se ha desarrollado y las referencias de los investigadores de celdas solares.

TABLA I. 5. 1

PRECIO	MATERIAL	EFIC.	AMBIENTE	REFERENCIA
\$/watt-pico		%		
1, 250	CdS	6	espacio	RODOT(1967)
6, 000	Si	12	espacio	RODOT(1964)
4, 500	Si	12	espacio	RODOT(1967)
5, 000	Si	14	espacio	PERKINZ(1968)
2, 000	Si	8	terrestre	PEREZ E. (1967)
1, 300	Si	8	terrestre	PEREZ E. (1967)
			(usando concentradores)	
1, 250	Si	13	espacio	PANEL(1972)
400•	Si	11-12	terrestre	RTC (1975)

FIG.(I.5.7)

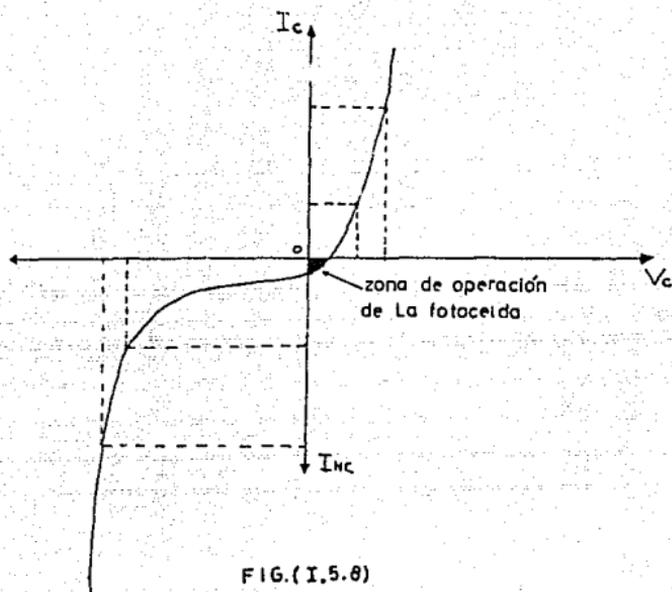
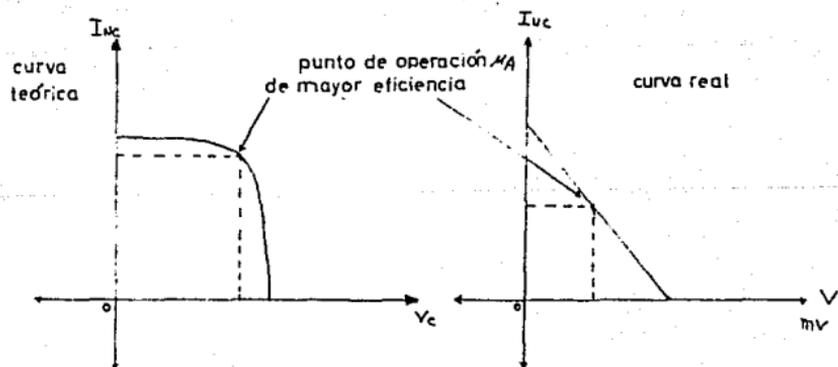


FIG.(I.5.8)



500 (hasta 150 W.)	Si	11-12	terrestre	S.P.C. (1975)
400 (hasta 750 W.)	Si	11-12	terrestre	S.P.C. (1975)
350 (hasta 1500 W.)	Si	11-12	terrestre	S.P.C. (1975)
300 (superior a 1500)	Si	11-12	terrestre	S.P.C. (1975)
150 (costo de producción).	Si	11-12	terrestre	PALZ (1974)

La gráfica de la fig. I.5.9 muestra los precios actuales y esperados de los módulos solares. En 1975-1976, el precio fué de 20 dólares /watt-pico (watt eléctrico generado cuando la insolación es de 1 Kw/m^2 , - insolación normal promedio al medio día en nuestro país), en tanto que el precio esperado para 1980 será de 5 dólares/watt-pico; se predicen precios de 2 dólares, 1, 0.5 dólar para 1983, 1984, 1985, como se puede apreciar en la gráfica.

Los generadores solares que utilizan esta técnica de conversión directa de la energía, están muy lejos de competir con las formas convencionales de generación de energía eléctrica (hidro, termo, geotermo y núcleo eléctricas), sin embargo, en nuestro país se podrían tener aplicaciones en el medio rural, en regiones muy aisladas donde se utilizan medios convencionales como son: Diesel y electroquímicos (acumuladores), debi

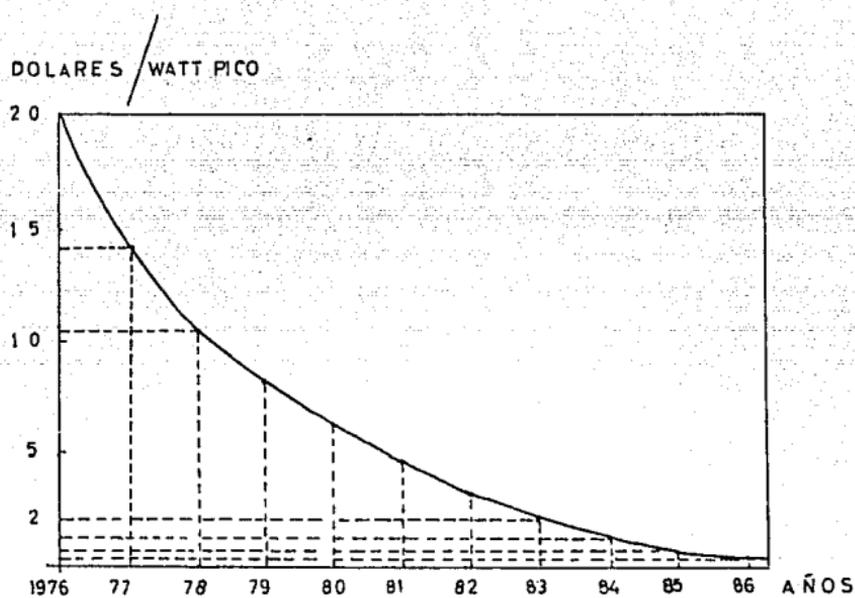


FIG.(I.5.9)

do a que el consumo de energía es muy bajo.

En las figs. 1.5.10 y 1.5.11 se muestra una comparación de los precios de la energía generada (Kwh) por medio de módulos fotovoltaicos y la de los sistemas convencionales antes mencionados.

DESARROLLO EN MEXICO.

En nuestro país se ha venido desarrollando la tecnología fotovoltaica de celdas solares desde hace doce años en el Departamento de Ingeniería Eléctrica del centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. En 1973 se desarrolló un módulo solar de 1.5 watts de potencia, con 24 celdas de silicio de 3.75 cm. de diametro, con una eficiencia de 10%. Además en ese centro se está desarrollando un proyecto para aplicaciones en el medio rural (sistema de educación por TV., sistema de radiocomunicación, bombeo de agua y unidades de insolación), con una capacidad de 50 Kw/año en total.

En el Centro de Investigación de Materiales de la UNAM., se está desarrollando una tecnología con celdas de sulfuro de cadmio.

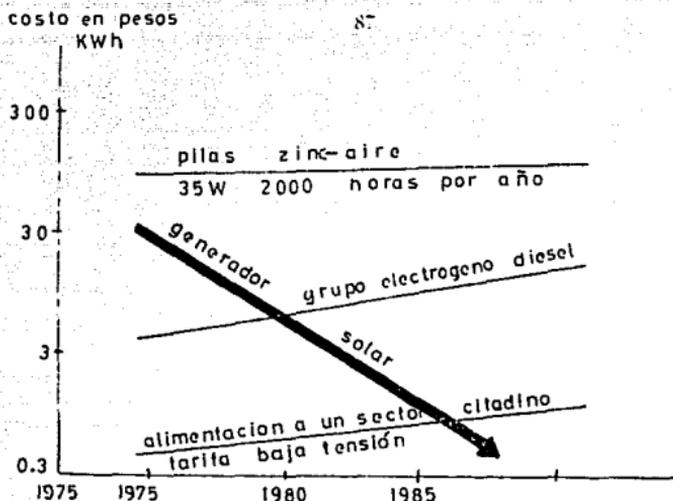


FIG.(I.5.10) COMPARACION DE LOS PRECIOS DE LA ENERGIA GENERADA (KWH.) POR MODULOS FOTOVOLTAICOS Y LOS SISTEMAS CONVENCIONALES

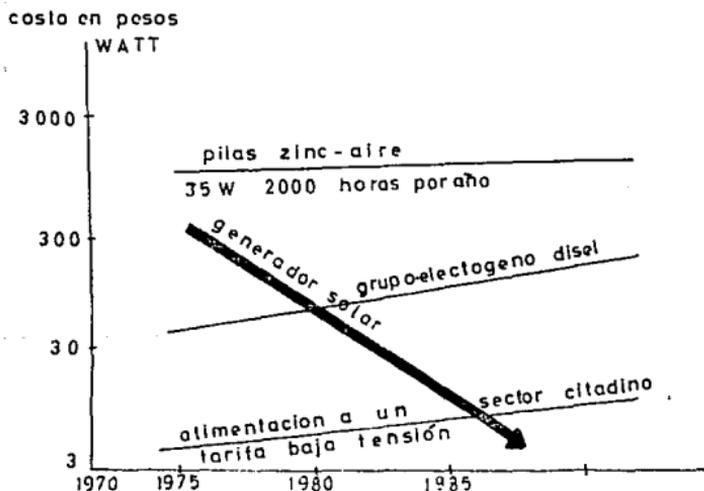


FIG.(I.5.11) COMPARACION DE PRECIOS DE POT. INSTALADA (W) POR MODULOS FOTOVOLTAICO VS. SISTEMAS CONVENCIONALES.

1.6.

ENERGIA DEL VIENTO

Los inventos que encierra la energía solar a través de reflectores y dispositivos de lentes son fascinantes a la imaginación pero relativamente insignificantes en cuanto a potencial. De hecho trabajan pocas horas - diariamente cuando el sol está en un ángulo favorable.

El viento está clasificado por lo mismo como el mejor medio terrestre para capturar y almacenar la energía solar. El agua y las ondas de aire que circulan alrededor de nuestro planeta son medios excelentes - para acumular energía, la cual puede ser usada para generar electricidad y para operar sistemas de potencia neumática e hidráulica.

Los molinos de viento producen potencia a partir de las diferencias de calor generadas por el sol (que son la fuente de todo viento) con mucho mayor eficiencia que otros sistemas que intentan concentrar y almacenar la radiación directa del sol. Pero la consideración más importante respecto a la potencia del viento es la apreciación, de que es la forma más eficiente de recapturar la potencia solar.

La energía que proviene del sol como radiación baña un hemisferio de la atmósfera terrestre, esta masa atmosférica es cinéticamente acelerada, mientras que las partículas de otro hemisferio al no recibir esta radiación se desaceleran.

Toda la radiación solar capturada alrededor de la Tierra perturba la atmósfera a través de columnas térmicas que se levantan en los océanos y laderas. El lado oscuro de la atmósfera se contrae, mientras que el lado soleado se expande. Este movimiento atmosférico produce un gran número de diferencias de temperatura, que alrededor del mundo producen corrientes de aire que dan origen a las turbulencias terrestres. La combi

nación de la masa atmosférica acelerada y la desacelerada convierte la energía solar en potencia del viento.

La energía eólica es acumulada por el aire en forma de velocidad, y esta velocidad es desarrollada por las siguientes condiciones:

1. - Rotación y translación terrestre
2. - Atracción lunar, mareas
3. - Campo magnético terrestre
4. - Diferencial de temperatura en la atmósfera debida al calor solar.
5. - Diferencial de temperatura sobre la superficie terrestre, continentes y mares.
6. - Diferencial en densidad del aire con relación al nivel del mar.
7. - Canalizaciones del viento debido a la conformación terrestre, mares, montañas y valles.
8. - Por la ecología de la zona.
9. - Por la precipitación pluvial.

Con el análisis de estas condiciones se efectúan los estudios para la instalación de turbinas de aire para la generación eléctrica eólica.

DESARROLLO DE LA ENERGIA EOLICA EN EL MUNDO.

La energía eólica ha sido y es utilizada mundialmente por el hombre en las siguientes aplicaciones; en la navegación a vela, en molinos de granos, en transportación aérea, extracción de agua, y actualmente en la generación de energía eléctrica.

Estudios recientes hechos por la National Science Foundation de los Estados Unidos, nos proporcionan datos estadísticos de que la poten-

cia del viento puede aportar cantidades importantes de energía para diversas aplicaciones y que esto se puede lograr en un corto plazo.

La tecnología para generar electricidad y bombear agua usando la -- energía eólica por medio de molinos de viento ha sido bien establecida, --- siempre y cuando se produzca en pequeñas escalas.

En el principio de la década de los cuarentas se edificó una turbina - de aire (Putnam-Smith) en la cima de una montaña en Vermont, que era im- pulsada por una hélice de dos paletas de 53 metros de diámetro. Esta uni- dad operó continuamente durante varios años hasta que una de las paletas - falló en 1945. Fabricantes de Europa, Australia y los Estados Unidos ofre- cen generadores de potencia de viento con capacidad de 10 Kilowatts para - satisfacer pequeñas necesidades en zonas remotas en donde no tienen elec- tricidad.

La NASA y ERDA montaron cerca de Sandusky, Ohio, Estados Uni- dos, una torre de 30 metros de altura que soporta a una turbina de aire de 2 aspas de 37,5 metros de diámetro, acoplada a un generador de 125 KVA, - 60 ciclos y 480 voltios que opera con vientos mínimos de 27 Km/hora.

DESARROLLO DE LA ENERGIA EOLICA EN MEXICO.

En México la Secretaría de la Presidencia a través de la Comisión - de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) ha elaborado trabajos cuya finalidad es la formulación del inventario de los recursos con que cuenta el país. De ello puede disponerse de la información de las últimas cinco -- condiciones mencionadas anteriormente; sin esta información no sería posi

ble el estudio de la energía eólica.

Es de mención especial una zona única en México, que se encuentra en el Istmo de Tehuantepec y cubre una extensa región de fuertes vientos - unidireccionales, uniformes y constantes todo el tiempo, dicha zona es la estación llamada "La Ventosa" en el estado de Oaxaca.

En esta zona natural de fuertes vientos con velocidades promedio - de 50 Km/hora, es donde se deben instalar las plantas de energía eléctrica, que en su fase inicial y experimental serían del orden de 1000 KVA con unidades de 100, 200 y 500 KVA.

Sin embargo para captar el viento es necesario construir obras civiles para encauzar los volúmenes de aire a través de la turbina y que esta los reciba en forma uniforme y no en forma turbulenta para su mejor aprovechamiento.

Esta zona cubre un área de utilización de 25 kilómetros cuadrados - aproximadamente en donde es factible obtener 40 mil kilowatts de energía eléctrica por kilómetro cuadrado, o sea un millón de Kilowatts en la zona. Los cuales se podrían desarrollar en unos cuatro años aproximadamente.

El costo estimado para llevar a cabo las investigaciones y construcciones primarias para la generación de los primeros 1000 Kilowatts es --- aproximadamente de 20 millones de pesos.

1.7.

**DIFERENCIA DE TEMPERATURAS
EN LOS OCEANOS.**

La mayor parte de la energía solar que incide sobre la tierra es recibida por los océanos y esto se debe simplemente a que cubren las tres cuartas partes de la superficie terrestre. En muchas regiones tropicales y subtropicales del mundo las temperaturas de la superficie del océano varían entre 25 y 30°C, sin embargo solo se calienta la capa superficial y en las profundidades digamos a 600 m. el rango de temperaturas es de 2 a 7°C. Esta diferencia de temperaturas puede ser usada para mover una máquina térmica y producir trabajo mecánico.

Una planta térmica que usara la diferencia de temperaturas estaría constituida por una caldera colocada en la región caliente y un condensador colocado en la región fría. La caldera vaporizaría el fluido de trabajo y el vapor expandido movería una turbina produciendo trabajo mecánico, entonces el vapor sería conducido a través del condensador donde se enfriaría y ya en forma líquida regresaría a la caldera. En este caso las aguas calientes de la superficie del océano serían usadas como la fuente caliente del ciclo y las aguas frías de las profundidades como la fuente fría. Tal sistema puede proporcionar en principio cantidades importantes de energía. Este sería un sistema de energía solar con todo el océano sirviendo como colector y almacén de energía. Sin embargo la eficiencia de tales plantas sería solamente de 2 a 4%.

A continuación se considerarán dos tipos de plantas que nos permitirán apreciar la importancia práctica de tales unidades de conversión de energía.

El primer tipo es el sistema de ciclo abierto mostrado en la Figura -

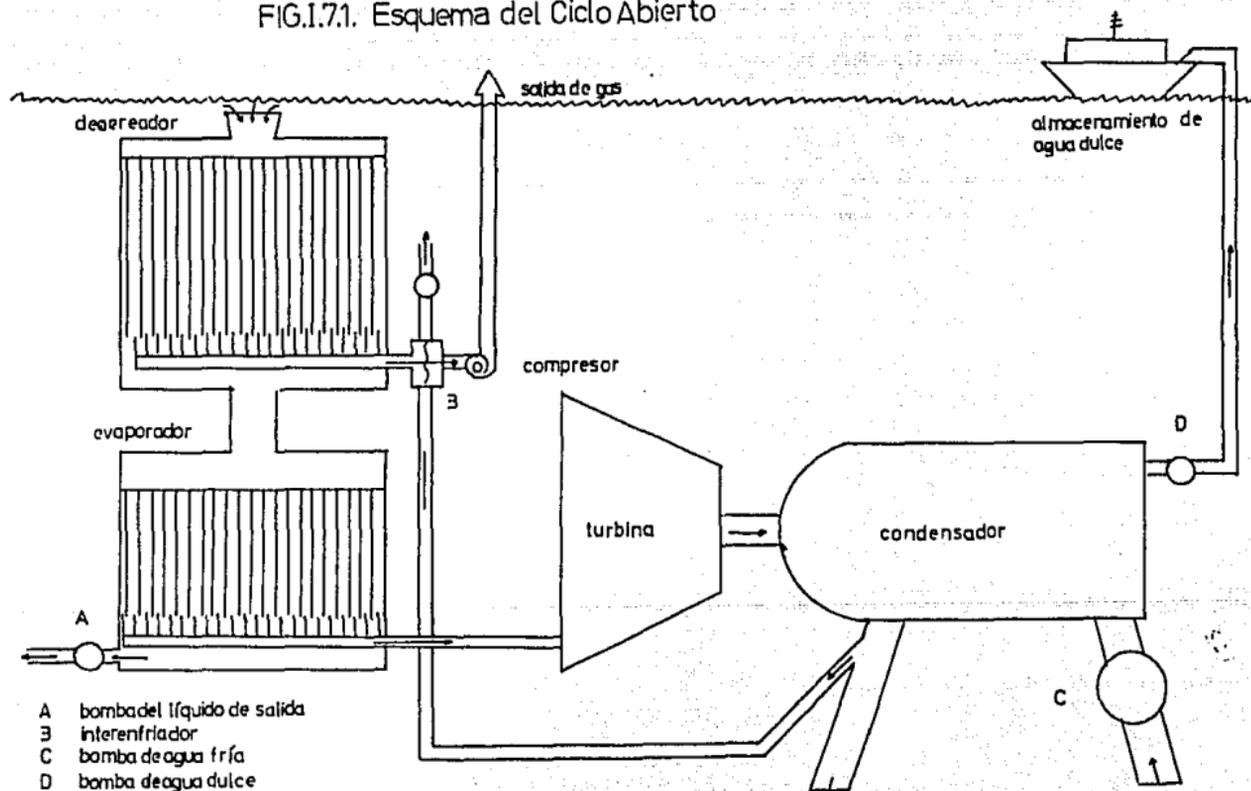
1.7.1., el cual usa agua de mar como fluido de trabajo.

La posibilidad de construir una planta de conversión de la energía térmica del océano de 100 MW (Brutos) o 59 MW (netos), fué estudiada por científicos de la Universidad de Massachusetts los cuales encontraron que para producir esta cantidad de energía requieran componentes muy pesadas. Por ejemplo, la turbina de flujo radial tendría cuchillas con más de 70 m. de diámetro. El evaporador y el deaerador tendrían que manejar alrededor de 7 millones de lt. /min. de agua de mar para producir los 70 000 lt. /min. de vapor requerido por la turbina. De este estudio se concluyó que el aprovechamiento de ciclo abierto puede no ser económicamente factible, ya que la sola turbina costaría por lo menos 2 100 dólares/KW. El sistema sin embargo puede tener aplicación como un método para producir agua dulce. La planta en cuestión (Menos la turbina) produciría alrededor de 100×10^6 lt. /día de agua desalinada.

El segundo tipo son los sistemas de ciclo cerrado que usan como fluidos de trabajo el amoníaco, el propano o el freón. La economía de estos sistemas es también bastante incierta, aunque los diseñadores afirman que los costos de las primeras plantas varían de 2 000 a 3 000 dólares/KW. Las personas que proponen este aprovechamiento dicen que la conversión de la energía térmica del océano proporciona su propio sistema de almacenamiento por lo que debe ser desarrollado a pesar de los altos costos.

La construcción de plantas flotantes de potencia térmica del océano será una empresa ambiciosa y cara, sin embargo en muchas formas ésta es alternativamente más atractiva que la potencia nuclear, ya que no involucra nin

FIG.I.71. Esquema del Ciclo Abierto



gún conocimiento nuevo y además es una fuente inagotable de potencia limpia, segura y confiable. Además tales plantas pueden proporcionar muchos otros beneficios ya que como se mencionó anteriormente pueden ser diseñadas para producir agua dulce, pueden utilizarse como plantas industriales flotantes para extraer minerales del agua del mar, y pueden beneficiar a la industria pesquera debido a que las aguas profundas son ricas en nutrientes que al ser extraídos a la superficie son útiles para las algas y otros pequeños organismos que a su vez sirven como alimento a un gran número de peces.

Como conclusión cabe mencionar que se debe llevar a cabo más investigación y más desarrollo para que se logre una contribución más significativa de tales sistemas de conversión de la energía térmica del océano.

Actualmente en México no existen estudios de este tipo de plantas.

1.8

**ENERGIA A PARTIR DE
MATERIALES ORGANICOS**

Consideramos ahora la utilización de materiales orgánicos para la producción de energía y combustibles, la cuál se conoce con el nombre de conversión biomasa. La lámina 1.8.1. muestra un mapa esquemático de los diversos elementos de este aprovechamiento.

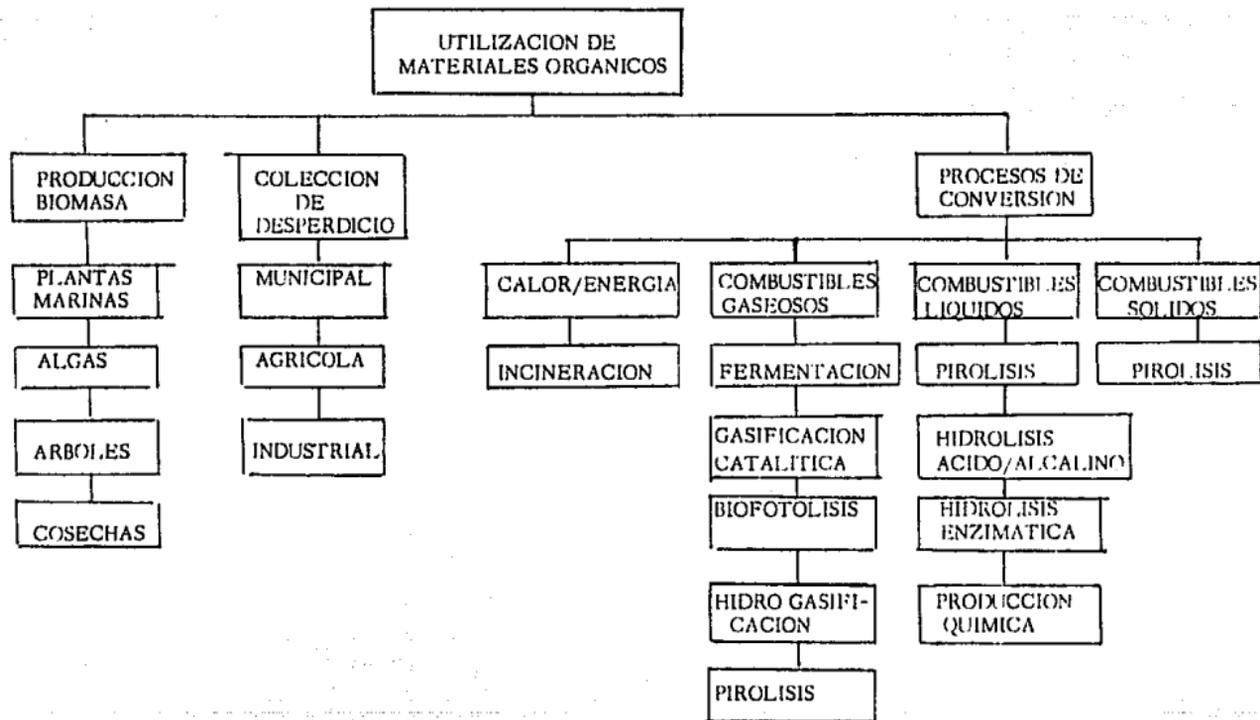
Una corriente interesante se centra en la producción de combustibles a partir de desperdicios orgánicos por los diversos métodos mostrados en la lámina 1.8.1. Los productos finales que se obtienen son metano, metanol, carbón de leña y otros orgánicos.

La conversión del desperdicio orgánico en energía o combustible también ayuda a resolver el problema de la costosa disposición municipal de desperdicios. La producción de vapor y potencia eléctrica obtenidos quemando los desperdicios sólidos urbanos es practicada ampliamente en Europa, especialmente en Alemania.

Otro proyecto de conversión biomasa es el llamado "plantación de energía", donde plantas que crecen rápidamente son producidas como una fuente de combustible para una planta de potencia. Aunque una forestación normal produce solamente alrededor de 2 toneladas por acre por año de biomasa, algunas especies de plantas tales como el sicómoro, el aliso o caña tienen 10 veces más ésta producción. Sin embargo son requeridas con esta alta producción grandes áreas de tierra. Se necesitan 1300 Km² de tierra para sostener una planta de 1000 MW. El agua requerida es de 300 millones de metros cúbicos/año y las maniobras del manejo de grandes volúmenes de material involucrado también serían problemáticas. Con la escasez actual de pulpa de madera y comida en el mundo, el uso de la tierra para la produc

LAMINA 1.8.1.

CONCEPTOS DE LA PRODUCCION DE COMBUSTIBLE Y ENERGIA



ción de energía térmica en lugar de aliviar estas carestas sería sumamente problemático.

Otros aprovechamientos de la bioconversión parece ser que tendrán gran futuro. Es posible que los desarrollos radicales en las técnicas de cultivo de algas puedan proporcionar una ruta práctica para la obtención de energía a partir de cultivos biomasa.

El presupuesto de la ERDA en los U. S. A. para el desarrollo de combustibles a partir de cantidades biomasa es de alrededor de 4 millones de dólares al año.

1.9.

ENERGIA DE LAS OLAS

Otro aprovechamiento indirecto de la energía solar es el de la energía de las olas, el cual está recibiendo considerable atención en Gran Bretaña.

La Universidad de Edimburgo está actualmente investigando la posibilidad práctica de un ingenioso mecanismo para el uso de la energía de las olas. Experiencias realizadas en un buque-tanque indican que el 90% de la energía de las olas puede ser recuperada con este dispositivo. La compañía Estatal de Electricidad de Gran Bretaña (CEGB) estima, sin embargo, un costo para sostener esta fuente de energía de 1000 a 200 dolares/kw, el cual es sustancialmente más caro que el de la energía nuclear.

Otro aprovechamiento incluye el uso de muros con alturas ajustables hidráulicamente para las olas, las cuales son combinadas con el uso de un turbo-impulsor para incrementar la carga hidráulica.

Este aprovechamiento está todavía en fase de investigación inicial - en algunos países del mundo y su aplicación para la generación de energía eléctrica se hará hasta que se alcance una tecnología competitiva con los medios de generación actuales. Por lo tanto nada más hacemos mención de este tipo de aprovechamiento.

1. 10.

ENERGIA DE LAS MAREAS

Después de haber analizado la energía solar y las diferentes formas - como se manifiesta para su aprovechamiento, consideramos ahora la energía de las mareas, la cuál ha sido objeto de interés desde hace mucho tiempo, pero la falta de sitios adecuados con mareas muy altas ha entorpecido el desarrollo de este tipo de energía. A la elevación y caída diaria de las aguas del mar se le llama mareas, las cuales no se repiten al mismo tiempo diariamente, ya que la marea alta de un día se presente aproximadamente 50 min. más tarde que la del día anterior. Un ciclo completo de dos mareas altas y dos mareas bajas se efectúa en 24 horas y 50 minutos, por lo que los tiempos de marea alta y baja se desplazan de un día para otro. Estos 50 minutos extras surgen debido a que las mareas son consecuencia principalmente de la atracción de la luna, y cuando la tierra gira la luna se mueve en su órbita y en una revolución de la tierra la luna se mueve lo suficiente para retardar las mareas 50 minutos.

Esta energía de las mareas se analiza dentro de las formas indirectas de la energía solar, ya que la atracción gravitacional del sol también influye en las mareas en solo cerca de una tercera parte, debido a que el sol está -- mucho más lejos de la tierra que la luna. Sin embargo esto es suficiente para causar una importante variación en el nivel de la marea. Cuando el sol, la luna y la tierra están en línea recta, como durante luna llena, la atracción del sol y la luna se unen y se produce la máxima marea alta y la mínima marea baja que se conocen como mareas vivas. Durante el cuarto menguante y cuarto creciente la luna y el sol se encuentran en ángulos rectos por lo que sus -- atracciones no se suman y como resultado se tienen las llamadas mareas --

muertas.

En el mar abierto las mareas ascienden unos cuantos centímetros pero donde son concentradas por una bahía o por la desembocadura de un río, el ascenso y descenso total puede alcanzar 10 metros o más.

Durante los primeros años del siglo XI, en las costas de Inglaterra y Francia se usaron los molinos de mareas, muy similares a los molinos de ríos, que consistían en un simple dique construido a través de una entrada o caleta, donde el ascenso y descenso diario de agua hacía girar una rueda de molino. El desarrollo de la máquina de vapor trajo como consecuencia que el aprovechamiento de este tipo de energía fuera abandonado. Actualmente la necesidad de nuevas fuentes de energía no contaminantes está causando que los investigadores consideren la posibilidad de aprovechar las mareas.

La forma más simple de aprovechar la energía de las mareas consiste en permitir que la marea ascendente llene un estanque creado mediante un dique, cerrar las compuertas en la marea alta y cuando la marea baje hacer que el agua almacenada pase de regreso al mar a través de una turbina. Por lo que se obtendría potencia por cerca de 3 horas dos veces al día y solo se aprovecharía cerca de la mitad del potencial de la energía maremotriz.

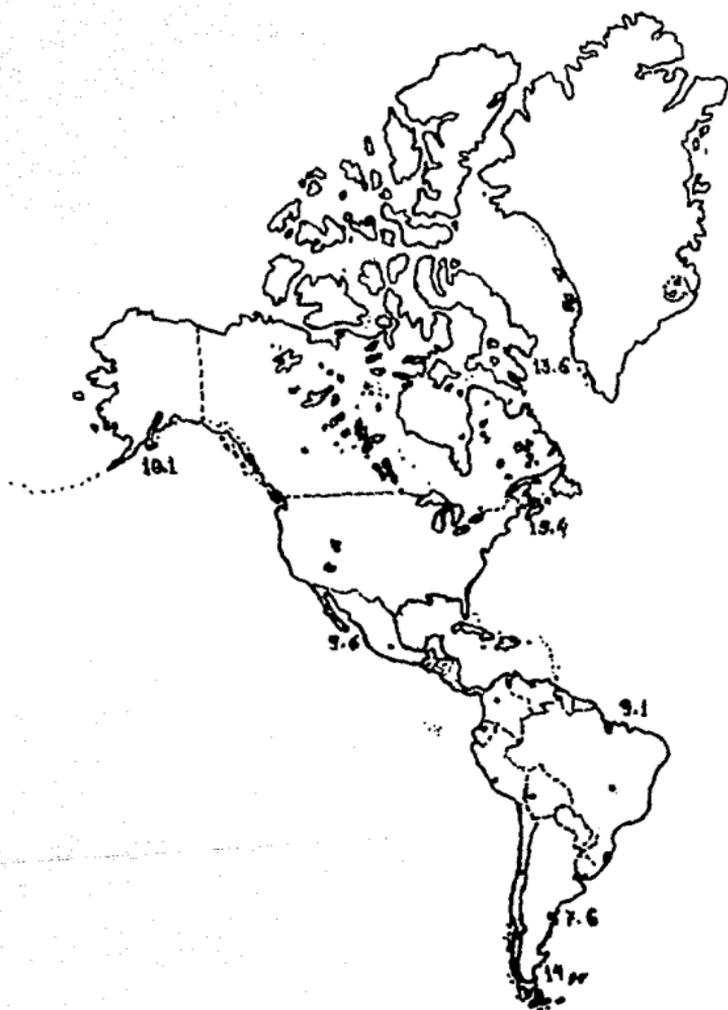
A este tipo de aprovechamiento se le han propuesto diversas variaciones, las cuales están basadas en el uso de turbo-bombas de bajo flujo, que permiten establecer un sistema de bombeo almacenador, cuyo principio básico de operación es bombear agua a un depósito superior usando potencia generada fuera del pico de demanda por la planta. Si la marea se usa para girar turbinas durante el ascenso y descenso, cerca de la mitad de la energía

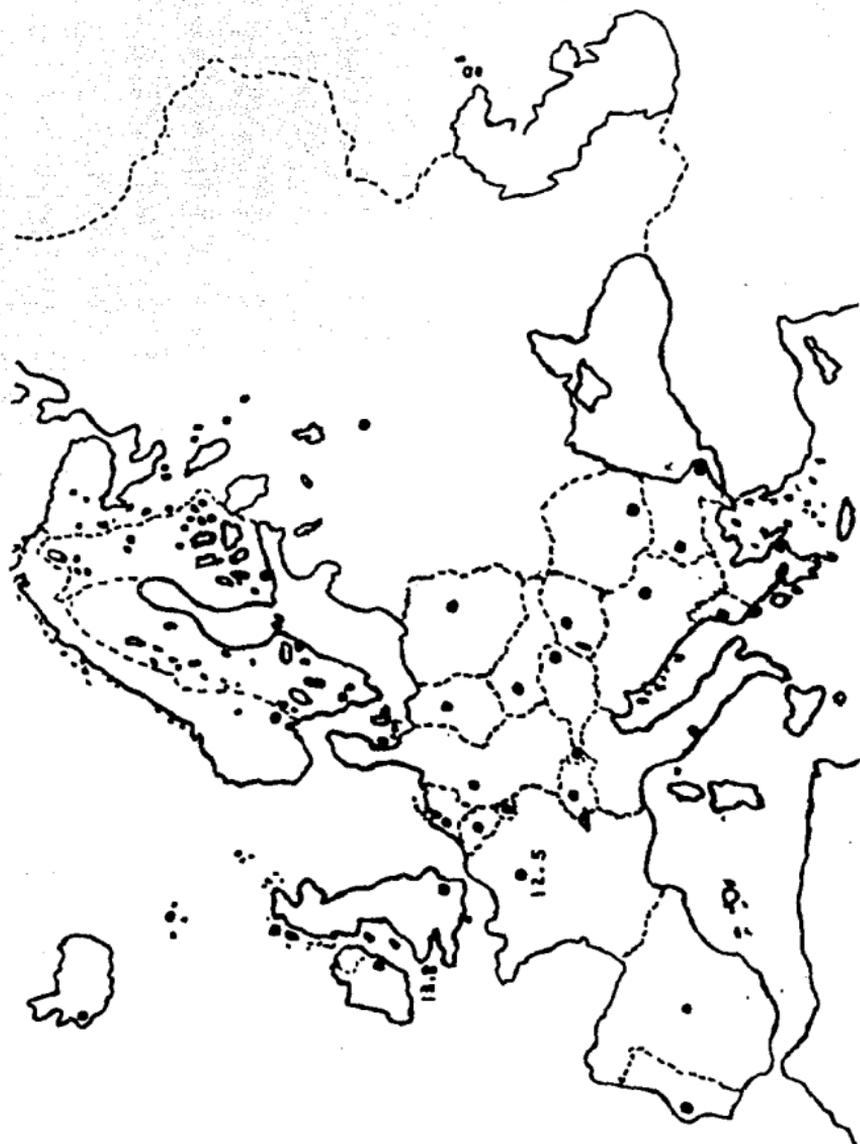
puede ser convertida. Para hacer esto al agua se le permite pasar a través de las turbinas cuando la marea asciende. Cuando se aprovecha la marea alta, la diferencia de los niveles se reduce hasta no poder hacer funcionar a las turbinas por lo que las compuertas son abiertas para vaciar el estanque y después permitir al mar llenarlo tan pronto como sea posible, cuando coinciden los niveles del mar y del estanque se cierra la compuerta y se espera que baje la marea, habiendo nuevamente una gran diferencia de niveles y haciéndose trabajar las turbinas. Cuando se aprovecha la baja marea nuevamente la diferencia de niveles se vuelve pequeña y no puede impulsar la turbina, así que se abren las compuertas y se permite que el estanque se vacie tan rápido como sea posible, se cierran las compuertas y se espera la marea alta, cuando nuevamente existe la suficiente diferencia de niveles se permite al agua pasar a través de la turbina llenando el estanque e iniciar un nuevo ciclo.

La desventaja principal de ambos sistemas es que son intermitentes, además de su programa de entregar potencia en días de 24 horas 50 minutos, por lo que existen proyectos que usan dos o tres estanques para aprovechar las mareas altas y bajas; otras desventajas son la variación de rango entre las mareas vivas las muertas y los posibles efectos en la pesca y navegación, ya que estos son proyectos a gran escala.

En los mapas que se muestran se pueden ver los puntos donde se presentan condiciones favorables para el aprovechamiento de las mareas en la generación de la energía eléctrica, mostrándose la diferencia de niveles entre alta y baja mar.

En la bahía de Fundy-Passamaquoidel y donde hay una diferencia de -





niveles de 15.4 mts. se realizaron trabajos hasta con 5000.0 hombres para montar una planta, pero el proyecto fue abandonado entre otras cosas por que en el lugar no hay mucha demanda de energía eléctrica y se tendría que transportar a grandes distancias presentandose problemas por las pérdidas en las líneas, gastos de mantenimiento y costos.

Otro proyecto que fué abandonado se realizó en Gran Bretaña donde se registran diferencia de niveles de 13.8 mts. hay otros lugares como la bahía de Frobisher, la desembocadura del Amazonas, Golfo de San José, la zona del estrecho de Magallanes, la bahía de la Somme y sobre todo la bahía de Mont-Saint-Michel y la isla de Chausey donde se han hecho proyectos sin llevarlos a cabo por estar fuera de las posibilidades técnicas.

El sitio de la Rance, Francia presenta un lugar excelente ya que tiene un fondo rocoso, poco oleaje, gran diferencia de niveles de la marea, y una vasta cuenca interior construida por el río. La potencia de una planta mareomotriz es proporcional a la superficie de su cuenca y al cuadrado de la amplitud de su marea. En la Rance la amplitud llega a 13.5 mts. y la cuenca tiene una superficie de 22 Km^2 logrando una producción a partir de 1967 de 240 MW. La casa de potencia está incluida en el dique; ésta es una larga galería que contiene grúas y máquinas para servicio de los turbogeneradores. Hay 24 turbogeneradores con capacidad de 10 MW cada uno y sumergidos en un conducto cónico. Las primeras cuatro unidades entraron en servicio en julio de 1966. El costo de la planta es de 100 millones de dólares. Las turbinas reversibles permiten generar potencia en el ascenso y descenso de las mareas.

Para incrementar la potencia, en lugar de parar las turbinas para espe

rar que la marea baje o suba se alimenta potencia externa a los generadores, éstos actuando como motores, giran las turbinas que bombean agua al estanque o la sacan según sea alta o baja marea la que se espera y así se incrementa la potencia generada en un 25%.

La operación exitosa de esta planta ha probado que la potencia de las mareas es práctica y confiable, pero está muy lejos de ser una solución total para las necesidades de energía, no por eso deja de tener un lugar importante en planes futuros.

1 1

ENERGIA GEOTERMICA

11. 1.

GENERALIDADES

La energía geotérmica, como su nombre lo indica, es la energía que en forma de calor se encuentra almacenada o se genera en el interior de la tierra. El origen de este calor se ha tratado de explicar por medio de muchas teorías; una de ellas es la que se refiere a que el calor existente en el seno de la tierra es todavía parte del que retuvo de su formación, el cual se ha ido enfriando paulatinamente. Otra teoría, la más aceptada actualmente, nos dice que el origen de este calor proviene de la radiactividad de las rocas, las que en su gran mayoría tienen cantidades de elementos radiactivos de los cuales los únicos que nos proporcionan cantidades importantes de calor son : el uranio, torio y el potasio 40.

Las 4 fuentes básicas de la energía geotérmica son las siguientes : vapor seco, agua caliente, fluidos geopresurizados y roca seca caliente. Los manantiales calientes, geysers, fumarolas y erupciones volcánicas son solo manifestaciones superficiales del calor interno de la tierra.

A pesar de que existen estas 4 fuentes básicas como recursos geotérmicos, únicamente el vapor seco y el agua caliente han sido debidamente utilizados para generar electricidad o para usos domésticos en invernaderos o calefacción.

Un recurso geotérmico es esencialmente el calor generado en el interior de la tierra y recuperado por algún medio como agua caliente o vapor de agua. Algunos materiales obtenidos en el proceso de recuperación se consideran también como recursos geotérmicos. Cuando el calor de la tierra es recuperado, puede ser útil para producir trabajo. Los usos que se le asignen dependerán de la entalpía (contenido de calor) y del estado físico y químico

co del medio de transferencia. Actualmente no se le ha encontrado aplicación directa a la lava fundida de muy alta temperatura (arriba de 800 °C). Simplemente a la roca seca caliente solo se le han encontrado usos muy limitados y locales. Los fluidos acuosos de alta entalpía (arriba de 200 Cal./g) son de uso comprobado en la generación de electricidad y en procesos industriales, además pueden encontrar aplicaciones en el proceso de desalinación del agua, y los fluidos de baja entalpía (arriba de 100 Cal./g) son usados en la calefacción del medio y en la agricultura. Aún más, ciertas aguas mineralizadas ceden valiosos productos químicos, como resultado de la extracción del calor o bien de la desalinación. El desarrollo en la tecnología del intercambio del calor y de la desalinación pueden extender significativamente el uso de los fluidos de baja entalpía en las siguientes décadas.

Los sistemas geotérmicos de alta entalpía solo se conocen en regiones de vigoroso vulcanismo y en zonas con fallas geológicas de la corteza terrestre y de recientes manifestaciones volcánicas. Las principales regiones geotérmicas de este tipo son : el cinturón del pacífico, el grupo de islas de la hendidura del atlántico medio, las zonas agrietadas del este de Africa y de el medio Oriente y el cinturón irregular de montañas y valles que se extienden desde la cuenca del Mediterráneo de Europa y norte de Africa a través de Asia hasta el Pacífico.

Los fluidos de baja entalpía son mucho más abundantes en zonas volcánicas y otras zonas y representan una gran reserva de energía útil. Las principales áreas geotérmicas de fluidos de este tipo incluyen las costas del golfo en los E. U. A. , una extensa región del oeste de Siberia, una parte de -

Europa Central al norte de los Alpes y las montañas de los Carpatos. Geológicamente estos son estanques sedimentarios sumergidos en los límites cerrados de los márgenes de las montañas. El agua encontrada en estanques sedimentarios durante exploraciones petroleras ha sido usualmente considerada como un perjuicio. Pero en el futuro estas aguas calientes de entalpía relativamente baja pueden representar una fuente de energía tan valiosa como el petróleo y quizás muy extensa. Otras aguas de baja entalpía han sido encontradas en pozos y minas o como manantiales de viejas montañas.

11.2.

RESERVORIOS GEOTERMICOS

Un campo geotérmico geológicamente está constituido por tres elementos principales (Fig. 11.2.1).

1. - Una fuente de calor, o sea un depósito producto del Magma.
2. - Un acuífero
3. - Una cobertura de material impermeable.

La fuente de calor, constituida por un basamento de roca granítica, calienta por conducción el agua de origen meteórico que se encuentra en los espacios vacíos de las rocas permeables o fracturadas, formando el acuífero; si el calor que le llega es elevado 10 o 20 veces más de lo normal y si la permeabilidad de la roca es elevada, el agua meteórica contenida en el acuífero circula por convección térmica. El sistema convectorio tiende a unificar la temperatura en todo el espesor del acuífero, donde la temperatura de la roca es la misma que la del agua; esto quiere decir que el gradiente de temperatura en el acuífero es pequeño, por lo tanto la línea de temperatura en él es casi una línea recta como se ve en la Fig. 11.2.2.

La temperatura del agua almacenada llega a alcanzar, en muchos casos la temperatura de saturación correspondiente a la presión hidrostática que es función de la profundidad a que se encuentra el acuífero.

Como se ha mencionado, arriba del acuífero hay una capa impermeable de arcilla u otros materiales, formando una cobertura; en ella el calor se transmite por conducción siguiendo la ley de Fourier, el gradiente por lo tanto es más elevado que el del acuífero que se encuentra debajo de él, por lo tanto la temperatura varía muy poco como se ve en la

Fig. 11.2.2.

Como el acuífero se encuentra debajo de la cobertura el agua no puede salir a la superficie, por lo tanto se encuentra sometida a presión hidráulica o sea a una atmósfera cada 10 metros de profundidad. Debido a la alta presión a que esta el agua, su punto de ebullición sube y el agua se encuentra en su fase líquida.

Un ejemplo para explicar más claramente la relación de temperatura y presión del acuífero se ilustra en la Fig. 11.2.3, el punto más alto del acuífero se encuentra en (A), a 500 metros de profundidad; ahí la presión es de 50 atmósferas y el punto de ebullición es de 263°C. aproximadamente; como en el agua se verifican movimientos convectivos, su temperatura difiere poco en todos los lugares del acuífero. En el punto (B) la profundidad es de 700 metros, la presión es de 70 atmósferas, pero la temperatura es la misma que en (A) y su punto de ebullición es de 283.5°C.

La clasificación de los diferentes yacimientos geotérmicos se puede hacer de diferentes formas: Con base en la salinidad total, características químicas dominantes, rangos de temperatura, estructura y composición geológica, presencia o ausencia de reservorios permeables y coberturas de aislamiento.

Nosotros tomaremos la clasificación que tome en cuenta la composición geológica y la disposición en que se encuentran sus tres partes principales en relación con la superficie de la corteza terrestre. De esta

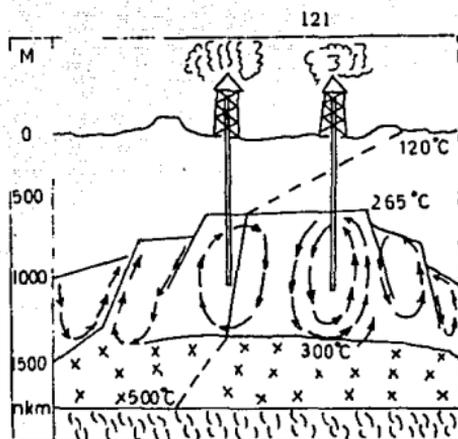


FIG.(II.2.2)

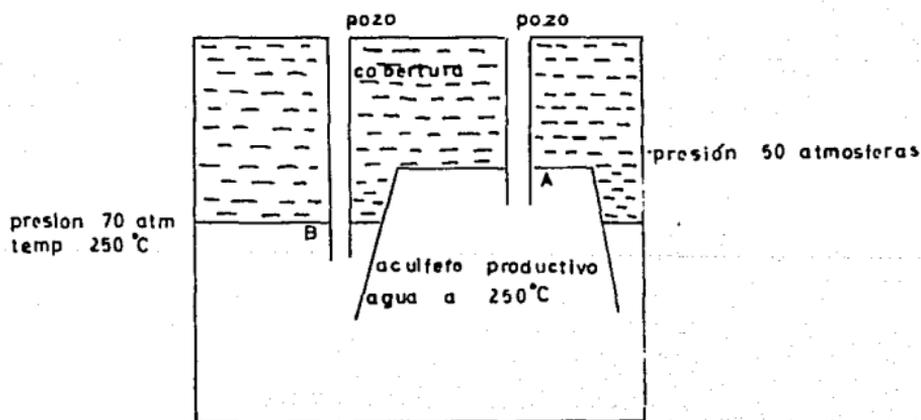


FIG.(II.2.3)

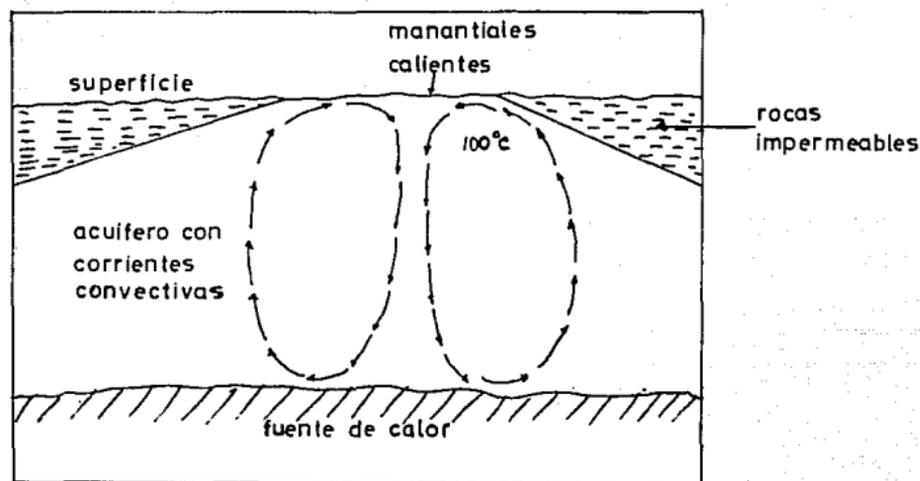
forma podemos hacer cuatro categorías de modelo geológico, las cuales abarcan las diferentes formas actuales de explotación.

Comparando los modelos de las Figs. 11.2.1. y 11.2.3. con el de la Fig. 11.2.4., estos difieren en que en los primeros hay una capa de cobertura que falta en el de la fig. 11.2.4., en este último el acuífero asoma a la superficie donde existen manantiales calientes y otras manifestaciones superficiales de calor. La presión en la superficie es la atmosférica y el punto de ebullición es de 100°C . Como consecuencia, cuando el acuífero que contiene el agua caliente asoma en gran parte a la superficie encontramos también en profundidades temperaturas de este orden; a esta categoría se la ha llamado de contacto, los cuales se explotan para calefacción o invernadero. Estos son los sistemas convectivos de agua caliente de baja temperatura.

Desde el punto de vista geoquímico estos manantiales tienen generalmente un contenido de sales más elevado que el de las aguas superficiales de la zona. Según la naturaleza de las capas geológicas que atraviesa en el subsuelo, estas aguas calientes pueden enriquecerse de sales diversas; las más comunes son los cloruros, los sulfatos y carbonatos; la temperatura de estas aguas puede ser de 50 a 100°C . En la fig. 11.2.5. se muestran las curvas características de la temperatura en relación con la profundidad de esta categoría y las siguientes.

La segunda categoría de los modelos geológicos llamada de fuga, está caracterizada por la Fig. 11.2.6., en la que hay un acuífero profundo que contiene agua a alta temperatura y está cubierto por un espesor

FIG. (II.2.4.)



suficiente de formaciones impermeables que impiden a las corrientes de convección llegar hasta la superficie. Una falla sin embargo, pone en comunicación el acuífero caliente con la superficie; la falla tiene un efecto semejante al de un pozo que llegue al acuífero caliente, o sea provoca en ese punto la vaporización del agua cuando esta se encuentra a una temperatura próxima al punto de ebullición. En efecto la falla pone en comunicación al acuífero con la superficie atravesando la cobertura y por lo tanto rebaja en ese punto la presión de la capa, el vapor por lo tanto remonta a lo largo de la falla hasta la capa de agua superficial con la que se mezcla.

Como el agua profunda llega en forma de vapor no lleva sales, en cambio el vapor se encuentra mezclado con gases volátiles disueltos en el agua profunda, los cuáles revelan la verdadera naturaleza de esos manantiales; estos gases que revelan dicha naturaleza son varios, dos de ellos son el Borax y el amoníaco.

Dentro de estas categorías podemos citar tres diferentes formas de yacimientos geotérmicos, los cuales tienen diferencias en cuanto a la formación del sello o cobertura, su presión, profundidad y temperatura.

La primera forma que mencionaremos es como la que se muestra en las Figuras 11.2.1. y 11.2.2., la cual tiene una cobertura natural de arcilla impermeable con sedimentos de arenas finas y su gradiente de conductividad dominante es de baja temperatura cerca de la superficie. Algunos ejemplos de esta formación son los de Salton Sea (E. U. A) y Ce -

rro Prieto (México), en que debido a su cobertura los reservorios pueden alcanzar temperaturas de 360°C. En Salton Sea y en Cerro Prieto con las 2/3 partes de salinidad de agua de mar puede alcanzar 388°C, muy cerca de la temperatura crítica que es de 373°C.

La segunda forma de la formación geológica es la llamada de campos "Autosellantes" (self-sealing); esta difiere de la primera por la manera en que se forma la cobertura de sello. Un ejemplo de este tipo de formación es la del campo los Geysers (U. S. A), la cual tiene una cobertura eficaz debida a fenómenos hidrotermales. Los fluidos calientes llegaban antes a la superficie en mucho mayor cantidad de lo que hoy sucede. Estos fluidos naturales calientes transforman a la roca según varios procedimientos, siendo el más importante el de arcillificación; algunas zonas como la Franciscan Formation fueron más o menos impermeabilizadas de esta forma. Sin embargo también otros procesos contribuyen muy eficazmente a la impermeabilización, este proceso es el autosellante y se explica como sigue: Los fluidos, en su paso a través de las fisuras de las rocas fracturadas, fueron depositando elementos de calcita y sílice los cuales formaron vetas de uno a dos centímetros de ancho, transformándose las areniscas superficiales en una cobertura eficaz. La curva característica de esta formación es la (1) de la Fig. 11. 2. 5.

La tercera forma de esta categoría es como se ve en la Fig. 11. 2. 6., las diferencias con las primeras dos son en sus propiedades físicas, en cuanto a temperatura, presión y la profundidad a que se encuentran los acuíferos; esta forma es la denominada sistema de vapor seco, -

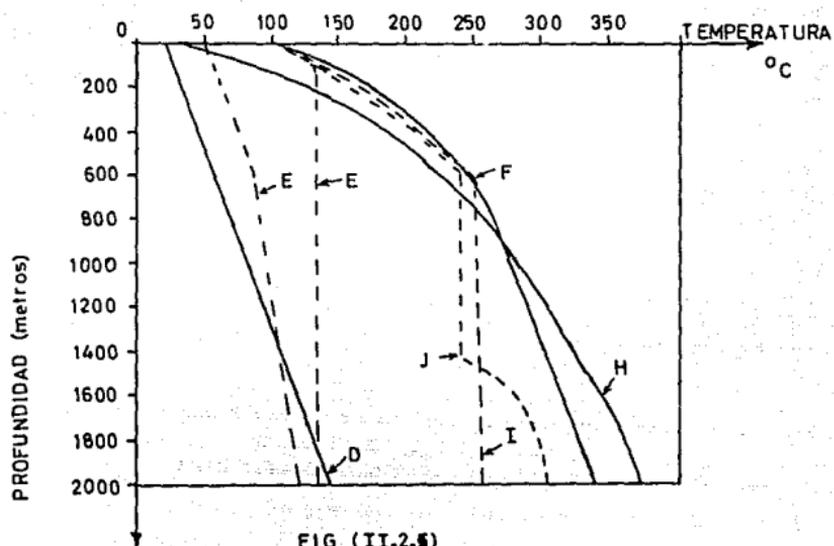


FIG (II.2.5)

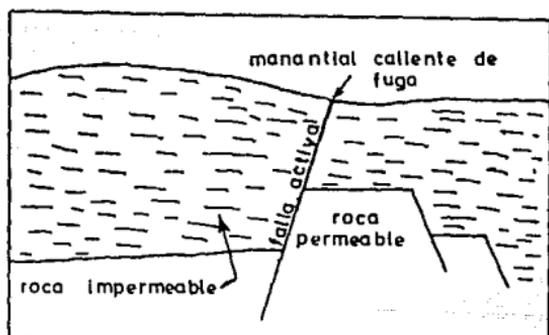


FIG (II.2.6)

porque dentro del acuífero el flujo convectivo dominante es el vapor; algunas veces se encuentra agua en muy poca cantidad pero no influye mucho, porque al salir a la superficie a la presión atmosférica sale completamente vapor el cual puede ser utilizado directamente por las turbinas, antes pasándolo por un separador de gases, los cuales llevan mezclados.

Estos reservorios a la profundidad de 350 metros tienen una temperatura inicial de 240°C , como se ve en la curva (J) de la Fig. 11.2.5. y presiones cerca de 35 Kg/cm^2 ; la temperatura y la presión inicial relativamente uniforme son grandemente influenciados por la entalpía máxima de vapor saturado (669.7 Cal/g a 236°C y 31.8 Kg/cm^2).

La tercera categoría de la cual podemos dar solamente pocas indicaciones, es la de las manifestaciones frías, ligadas sin embargo a la existencia de fenómenos hipertermales. Algunos ejemplos de estos son: Los depósitos de sílice hidrotermal, los travertinos, las asociaciones de minerales Galena-Blenda-Pirita, los depósitos de Borax, las alteraciones hidrotérmicas de las rocas, ciertos volcanes de lodo y ciertas manifestaciones de Bioxido de carbono (CO_2) y de H_2S .

La cuarta categoría, es la de las manifestaciones muy calientes, como por ejemplo las fumarolas de los volcanes, cuya temperatura está muy por arriba de la del punto de ebullición. Las posibilidades de explotación industrial de esta categoría son muy remotas, por lo tanto no se dará una mayor explicación.

11.3.

DESARROLLO DE LA GEOTERMIA EN EL MUNDO

La historia del desarrollo geotérmico comienza con la utilización de los manantiales térmicos como baños y lugares de curación y con el uso de las aguas térmicas para calefacción de hogares. La gente primitiva usaba ya el calor de las fumarolas para cocinar y en tierras áridas el vapor condensado para beber agua. Por siglos fueron utilizados el azufre depositado por el vapor de las fumarolas, las arcillas de caolín formadas por la descomposición de las rocas en zonas fumarólicas y en menor grado el mercurio y aluminio fumarólico. Pero fué en 1812 en Larderello, Italia, donde dió comienzo el moderno desarrollo geotérmico con la recuperación del ácido bórico de las fumarolas.

Más tarde fueron realizadas las primeras perforaciones para el aprovechamiento del vapor como combustible y para incrementar la fuente de material bórico.

En 1904 en Larderello se llevó a cabo el primer experimento para generar energía eléctrica a partir de vapor natural y en 1913 entró en servicio una estación generadora de 250 KW, marcándose el comienzo de la generación continua de electricidad geotérmica.

Después de la I Guerra Mundial el concepto de energía geotérmica se extendió por todo el mundo. En 1919 en Beppu, Japón se comenzaron las perforaciones experimentales y en 1924 se instaló y se operó un generador experimental de 1 Kw. En E. U. se realizaron perforaciones de prueba en los Geysers y Niland, California, en la década de los veinte y aunque se encontró vapor de baja presión los proyectos fueron abandonados debido a la falta de un mercado consumidor de energía eléctrica. También en E. U. entre

1920 y 1935 fueron perforados otros pozos en áreas fumarólicas, los más notables en el parque nacional de Yellowstone. En 1928 en Java se perforó un pozo, sin embargo no fué seguido el desarrollo.

En Islandia la exploración para perforación de acuíferos de agua caliente comenzó en 1928 en Reykjavik y más tarde se llevó a cabo en Reykir. En Rotorua, Nueva Zelandia, antes de 1940 ya habían sido perforados varios pozos de agua caliente para propósitos de calefacción. En este año fueron perforados una gran cantidad de pozos para uso doméstico, tanto en Rotorua como en algunos pueblos del sur del Lago Taupo.

La II Guerra Mundial rompió con los patrones tradicionales de vida y en la reconstrucción de la economía devastada por la guerra, la atención se enfocó nuevamente en la energía geotérmica. Esto fué lo que sucedió en Italia, Japón y Nueva Zelandia, ya que los tres países carecían de reservas de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica y en Italia y Japón los medios de generación y transmisión habían sido bastante dañados.

A continuación se intenta referir brevemente la historia de la exploración, explotación y el panorama futuro de la energía geotérmica en los países con mayores posibilidades de desarrollo:

ESTADOS UNIDOS

El desarrollo de la potencia geotermoeléctrica ha progresado rápidamente en los Geysers, California, desde que se instaló la primera turbina de 12 Mw. en 1960. La compañía Pacific Gas and Electric compró vapor a compañías productoras y lo convirtió en electricidad a través de turbinas condensantes a una razón de 9 Kg/Kwh. Más tarde en 1972 cerca de 2.75 millones -

de Kg de vapor seco fueron consumidos cada hora para producir 302 Mw. de potencia eléctrica. En 1973 y 1974 fueron instaladas otras dos plantas de 110 Mw cada una. En un principio se estimaba que serían instalados 110 Mw anualmente a lo largo de la década de los setentas, con lo cual para 1980 se tendrían aproximadamente 1200 Mw, sin embargo los trabajos de investigación y desarrollo se han visto seriamente retrasados debido a restricciones gubernamentales, principalmente por la protección ambiental.

Actualmente este país ocupa el primer lugar mundial en la generación geotermoeléctrica con la operación de 12 unidades en los Geysers, con una capacidad total de 602 Mw y a la fecha están por entrar en operación o en construcción varias unidades adicionales; recientemente se ordenaron las unidades 16 y 17 con capacidades de 115 Mw cada una.

ITALIA

Del simple generador de 250 Kw que se tenía en 1913, el complejo italiano ha crecido a una capacidad de 405 Mw, y con esto ocupa el segundo lugar en el mundo. (Los trabajos de recuperación de ácido bórico establecidos en 1812 fueron suspendidos en 1969 debido a la incapacidad de competir económicamente con otras fuentes de boro). El campo de Larderello produce vapor seco en 13 plantas con una capacidad total de operación de 365 MW, las cuatro plantas de Monte Amiata suministran 25 MW y la planta de Travale (Toscana) que recientemente entró en operación produce 15 MW. El tamaño de las turbinas que se utilizan en estos campos es pequeño ya que varía de 900 Kw. en unidades no condensantes en San Ippolito hasta las plantas de 26 MW en Larderello y Castenuovo. En los campos de Larderello y Monte

Amiata son generados aproximadamente 43 MW por medio de una serie de turbinas no condensantes. Las turbinas no condensantes fueron seleccionadas originalmente debido a su simplicidad, bajos costos de capital y facilidad de construcción, sin embargo consumen aproximadamente el doble de vapor por Kwh que las turbinas condensantes (20 Kg. vs. 10 Kg. para generar 1 Kwh). En una situación donde el vapor es abundante, el capital escaso y el tiempo corto, las turbinas no condensantes parecen ser más favorables, pero con la explotación del complejo Larderello a un punto donde muchos geólogos creen que la capacidad del campo ha sido o está muy cerca de ser alcanzada, la cantidad de vapor a ser usado se vuelve la variable más crítica. Por esta razón se está planeando la conversión a turbogeneradores condensantes, con lo cual se espera aumentar la capacidad de Larderello y Monte Amiata en 40 MW adicionales sin incrementar la producción de vapor.

NUEVA ZELANDIA

El desarrollo de la energía geotérmica en este país ha sido confinada largamente a la depresión volcánica de Taupo en la isla Norte. La utilización ha sido concentrada en Wairakei, donde opera una estación de 190 Mw; en Kawerau, donde cerca de 180 000 Kg/hr. de vapor son usados para producir papel de periódico, madera aserrada y para generar 10 MW de potencia eléctrica; y en Rotorua, donde el vapor y el agua caliente son muy usados para calefacción.

El agua caliente natural es usada en pequeña escala en Ngawha la isla Norte y en otras partes de la depresión de Taupo.

El descubrimiento del gas natural en las proximidades de la isla Norte

detuvo el desarrollo de la geotermia durante algunos años, pero de nuevo se han reiniciado los trabajos y se tiene planeado instalar una planta de 120 MW en el campo de Broad Lands.

MEXICO

Con la operación de una planta de 75 MW en Cerro Prieto, Baja California, México ocupa el 4° lugar en el panorama geotermoeléctrico mundial. Sin embargo esta no fué la primera estación geotermica mexicana que entró en operación, ya que anteriormente habfa operado de 1960 a 1972 una estación experimental en Pathe, Hidalgo.

A la fecha los trabajos de ampliación de la planta de Cerro Prieto se ha iniciado con miras a duplicar la capacidad instalada con otras dos unidades de 37.5 MW para 1979 y poner además en servicio para 1980 una 5a. unidad de baja presión de 30 MW. Se tiene en programa una segunda planta geotermoeléctrica en la misma zona, con cuatro unidades de 55 MW cada una que entrarán en servicio entre 1980 y 1983. Se estima que para fin de siglo se podrá tener una capacidad instalada en plantas geotermoeléctricas de 1000 a 1500 MW.

JAPON

La exploración geotérmica en este país comenzó en 1919 en Beppu y en 1924 en la isla Kyushu fué generado 1 Kw de potencia eléctrica. Más tarde entró en operación el primer sistema de calefacción de casas. Sin embargo no fué sino hasta los años posteriores en la II Guerra Mundial, con la industria japonesa en ruinas, cuando comenzó el verdadero desarrollo geotér-

mico. La agencia de Ciencia Industrial y Tecnológica que realiza los estudios geológicos y diversas compañías privadas de servicio eléctrico, perforación, minería y del Gobierno, comenzarán independientemente o conjuntamente la exploración de los recursos geológicos del Japón.

A la fecha se tiene instalada una capacidad de 67 MW distribuidos de la siguiente manera: Matsukawa 22 MW; Otake 10 MW, Onuma 10 MW; y Onikobe 25 MW. En un futuro cercano entrarán en operación las plantas de Hat-chobaro con una unidad de 50 KW y la Kakonda también con una unidad de -- 50 MW.

EL SALVADOR

En 1971 la Agencia Nacional de Electricidad de El Salvador eligió a la compañía LC. Electroconsult de Milán, Italia, para que diseñara una planta geotermoeléctrica con dos unidades de 30 MW y se construyera en Ahuachapán. Esto marcó el éxito completo de un programa de exploración patrocinado conjuntamente por el Gobierno local y las Naciones Unidas. Aún antes de que este programa comenzara en 1965, al Servicio Geológico Nacional de El Salvador había explorado el área fumarólica de Ahuachapán y perforado dos pozos poco profundos. En mayo de 1975 entró en operación la primera unidad y en julio de 1976 la segunda. La capacidad de producción será incrementada para 1980 a través de perforaciones adicionales y de la construcción de plantas. Una estimación conservativa del potencial desarrollable de Ahuachapán es de 100 MW para un período de 50 años.

UNION SOVIETICA

En 1969 fueron reportados en la Unión Sovietica once desarrollos geotérmicos. Entre los más significativos estaban el de generación de electricidad, En Pauzhetsk, con una unidad de 5 MW de capacidad, la planta experimental de ciclo binario en Paratunka, con capacidad de 750 Kw y las instalaciones para calefacción en Makhach Kala. Existían otros proyectos de calefacción en el Cáucaso, en el Oeste de Siberia, en Asia Central y en el Noroeste de Siberia. Para 1980 se tiene planeado tener una capacidad entre 22 y 25 MW.

ISLANDIA

Islandia es el primer país que usó el agua caliente para calefacción municipal en los años treinta de este siglo. Aproximadamente el 50% de los 200 000 pobladores reciben el servicio de calefacción geotérmica y se espera que aumente al 60% en esta década. Nueve de cada diez casas de Reykjavik reciben agua geotérmica para calefacción. Los campos de agua caliente de baja entalpía en Reykir y Keykjavik suministran esta energía de los reservorios a temperaturas base de 98 a 100 °C.

En Namafjall se abrió en 1969 una estación de potencia geotérmica de 3 MW.

En el sureste de Islandia se encuentran alineadas de Sureste a Noroeste, en intervalos de 30 Km, las zonas geotérmicas de Reykjanes, Krysuvik y Hengill, las cuales alcanzan temperaturas base de 280, 220 y 260 °C respectivamente. La mayor es Hengill que tiene un área de 70 Km² e incluye el --

importante campo geotérmico de Hveragerdi donde se tiene planeado instalar de 13 a 22 MW. Recientemente se recibieron noticias de que éste país ha ordenado dos unidades de 30 MW para la planta de Krafla.

NICARAGUA

En 1967 E. U. emprendió un proyecto de exploración geotérmica con el gobierno de Nicaragua. Fueron realizados estudios geofísicos detallados y evaluaciones geoquímicas y geológicas y fueron perforados una serie de pozos en terrenos fumarólicos cerca del volcán Momotambo. Un pozo perforado profundamente alcanzó temperaturas de 230 °C, sin embargo el proyecto fue dejado para otro tiempo. En 1972 las Naciones Unidas entraron en un acuerdo con el gobierno de Nicaragua para una segunda fase de exploración.

Actualmente Nicaragua ya tiene varios pozos y está en vías de adquirir una o dos unidades de 30 MW.

OTROS PAISES

Algunos otros países han realizado desarrollos geotérmicos para la utilización de esta energía en la generación de energía eléctrica, con plantas en construcción próximas a entrar en operación. Cabe mencionar a las Filipinas que tiene ordenadas 6 unidades de 55 MW cada una para hacer un total de 450 MW para el campo geotérmico de Tiwi, otro país es Chile que tiene planeada la instalación de una unidad de 20 a 30 MW en su campo geotérmico El Tatio. Con menos adelanto en sus estudios geotérmicos se encuentran Kenya, Etiopía, Indonesia, Taiwán, Turquía, Francia y algunos más.

II. 4

DESARROLLO Y POTENCIAL GEOTERMoeLECTRICO DE MEXICO

FOCOS TERMALES

Existen en la República Mexicana manifestaciones termales y una gran actividad tectónica, que están ampliamente distribuidas por todo el país, sin embargo destacan dos grandes zonas.

1. - Zona del Eje Neovolcánico. -

Situado en el centro del país, es una franja alargada que se extiende de oeste a este desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (abarcando los paralelos 18° y 22° de latitud norte), los principales focos son:
Edo. de Michoacán. -

Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, Los Baños, Agua Caliente, Pajacurán, Jeroche, El Pantano, San Sebastián, San Agustín, Hervidores y Huingo.

Edo. de Jalisco. -

Chilatán, La Higuera, Agua Caliente, Pajacuarán, y Sta. Rosa.

Edo. de Hidalgo. -

Calínoli, Tenaltango, El Tepe y Dios Padre, Pathé, Padrecito, Baños Sn. Marcos, Atotonilco el Grande, Amaha, Mina Paricutín y Tetepango.

Edo. de Puebla. -

Tlacomulco, Agua Azul, Libres, Los Humeros, Iztacala.

Edo. de México. -

San Pedro de los Baños, Los Baños, Ixtapan de la Sal, Vito.

Edo. de Querétaro. -

Cd. Querétaro, Tequisquiapan, Colón, Galindo, Tashido.

Distrito Federal. -

Peñón de los Baños.

Edo. de Guanajuato. -

Cd. León, Comanjilla, Agua Blanca, Caldera, Rancho Colorado, --
Los Baños, Atotonilco y Tabuada, San Bartolo y Agua Caliente.

Edo. de San Luis Potosí. -

Mina de Sta. Marfa de la Paz, Pozos Gogorrón, Ojo Caliente, Tani-
núl.

Edo. de Nayarit. -

Ruiz, Ixtacatán, Agua Caliente, Aguamiloya, Latinajas, Tetitlán y
Amatlán.

2. - Zona de Baja California. -

Se encuentra asociada a la falla de San Andrés y comprende princi-
palmente el Desierto de Altar (Sonora), El Valle de Mexicali en la penínsu-
la de Baja California. Los Focos termales en esta zona son los siguientes:
Cerro Prieto, Laguna Salada (oeste), Laguna Salada (este), Rífto, La Puer-
ta, Agua Caliente, El Estero, Azufreras, La Misión, Sta. Marfa, Agua --
Caliente, La Mina, La Paz, Guerrero Negro, Sta. Gertrudis, Bahfa de San
Luis, Pto. Peñasco, Divisadero Nte, Divisadero Sur, Sahuaripa, La Liber-
tad, Guaymas, El Tufanito y Agua Caliente.

Otras zonas de anomalías térmicas se encuentran en los siguientes
estados:

Chi huahua. -

Con los focos termales de Casas Grandes, Ojo Caliente, y Sta. Ro-
sa, Aldama, Cd. Chihuahua, Ojo Caliente, Agua Caliente.

Durango. -

Santiago Papasquiaro, Agua Caliente, Durango, Agua Caliente.

Chiapas. -

El Volcán, Chinulco, y Tocatepec, Talimán, Tapachula.

Oaxaca. -

Agua Caliente.

Guerrero. -

Rfo Papagayo.

Veracruz. -

Tinajital, El Carrizal y Agua Caliente, Conticomapán.

Coahuila. -

Ojo Caliente.

Nuevo León. -

Tapo Chico.

Tamaulipas. -

Soto la Marina, Agua Caliente.

Zacatecas. -

Atotonilco, Ojo Caliente, Sta. Rosa.

Aguascalientes. -

Cd. Aguascalientes.

1. - ZONA DEL EJE NEOVOLVANICO (Principales Campos Geotérmicos).

En México los estudios para la explotación de la energía geotérmica se iniciaron en el año de 1951 y los precursores fueron el Geólogo José Isita Septién y el Ing. Luis F. de Anda; este último presentó una conferen-

cia en 1963 denominada "Desarrollo Geotermoeléctrico en Italia y posibilidades de utilización en México.", esto trajo como consecuencia la formación de un comité formado por el Banco de México, La Nacional Financiera y la Comisión Federal de Electricidad denominado "Comisión de Energía Geotérmica".

Bajo los auspicios de este comité, en el año de 1955 se perforó el -- primer pozo en Pathé municipio de Tecozautla, Edo. de Hidalgo, Pathé está localizado en el eje neovolcánico que atravieza de este a oeste la meseta central desde el Pacífico a la costa del Golfo. Esta región comprende repetidas secuencias de areniscas, terciarias y basaltos que se encuentran sobre carbonatos cretáceos cubiertos con sedimentos y tova del cuaternario y que tienen una edad aproximada a los últimos años del terciario.

El primer pozo de Pathé empezó a producir el 14 de enero de 1956. El 20 de noviembre de 1959 entró en operación otro pozo con el cual se alimentó un tubogenerador de 3.5 MW. A partir de estos pozos, se han perforado aproximadamente 12 pozos de los cuales no se ha contado con suficientes pozos productores de vapor para operar el turbogenerador de 3.5 M. W. Estos pozos producen vapor o vapor de agua, y solamente cuatro pueden sostener el flujo; la producción es de profundidades variables ya que existe la creencia de que la permeabilidad se debe por fracturas en el terreno. La baja productividad por pozo y la tendencia de los pozos para producir vapor seco indican una baja permeabilidad y un limitado contenido del fluido en el reservorio. Al decaer la producción de vapor y en vista de las pocas probabilidades para localizar un pozo productor, las inversiones de la Comisión -

de Energía Geotérmica se destinaron a Cerro Prieto, B.C., esta planta de Pathé dejó de operar en 1972.

IXTLAN DE LOS HERVORES, EDO. DE MICHOACAN.

Dos pozos geotérmicos perforados en este campo en el año de 1966 produjeron a poca profundidad una mezcla de agua-vapor, el pozo No. 2 explotó en enero de 1968. La Entalpia en estos pozos es demasiado baja para poder aprovecharse en la generación directa de energía eléctrica. Otro pozo perforado a 1000 m. de profundidad produjo lo suficiente para demostrar la conveniencia de seguir explorando esta zona.

LOS NEGRITOS, MICHOACAN.

Se perforó un pozo exploratorio de 243 mm. de diámetro con una profundidad de 783 m, habiéndose obtenido agua caliente incapaz de mantenerse a alta temperatura considerándose que tal vez la profundidad no fué suficiente; dado que los estudios geoquímicos realizados indicaron existencia de elevadas temperaturas; existen programas de exploraciones adicionales.

LOS AZUFRES, MICHOACAN.

Estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos realizados indican -- una probable existencia de un gran yacimiento geotérmico profundo. Actualmente existe un programa de exploración en un área aproximada de 180 Km². y se inició la perforación del primer pozo profundo de exploración. Aquí el vapor sobrecalentado a temperaturas de 110 °C se manifiesta desde potentes fumarolas.

de Energía Geotérmica se destinaron a Cerro Prieto, B.C., esta planta de Pathé dejó de operar en 1972.

IXTLAN DE LOS HERVORES, EDO. DE MICHOACAN.

Dos pozos geotérmicos perforados en este campo en el año de 1966 produjeron a poca profundidad una mezcla de agua-vapor, el pozo No. 2 explotó en enero de 1968. La Entalpía en estos pozos es demasiado baja para poder aprovecharse en la generación directa de energía eléctrica. Otro pozo perforado a 1000 m. de profundidad produjo lo suficiente para demostrar la conveniencia de seguir explorando esta zona.

LOS NEGRITOS, MICHOACAN.

Se perforó un pozo exploratorio de 243 mm. de diámetro con una profundidad de 783 m, habiéndose obtenido agua caliente incapaz de mantenerse a alta temperatura considerándose que tal vez la profundidad no fué suficiente; dado que los estudios geoquímicos realizados indicaron existencia de elevadas temperaturas; existen programas de exploraciones adicionales.

LOS AZUFRES, MICHOACAN.

Estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos realizados indican -- una probable existencia de un gran yacimiento geotérmico profundo. Actualmente existe un programa de exploración en un área aproximada de 180 Km². y se inició la perforación del primer pozo profundo de exploración. Aquí el vapor sobrecalentado a temperaturas de 110 °C se manifiesta desde potentes fumarolas.

LA PRIMAVERA, JALISCO.

Estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, indican una gran zona geotérmica que comprende además, San Marcos, Hervores de la Vega y Soledad.

LOS HUMEROS, PUEBLA.

Se han realizado estudios sobre esta área indicando una zona termal localizada en la Sierra Madre Oriental. Aquí existen fumarolas de 90° C - en una caldera cuaternaria conteniendo riolitos, flujos basálticos y priolitas.

2. - ZONA DE BAJA CALIFORNIA.

CERRO PRIETO.

Se encuentra 30 Km. al sur de Mexicali (en los límites de México - con Estados Unidos) es la parte más al Sur explorada de la falla estructural de San Andrés que se extiende desde el mar Salton en los U. S. A. hasta el Golfo de California.

La zona geotérmica de Cerro Prieto está caracterizada por sedimentos deltaicos que sobreyacen a un basamento granítico oculto y fallada por los movimientos tectónicos del sistema de fallas de San Andrés.

Sobreyaciendo a éste basamento se encuentra una serie de capas alternadas de lutitas y de areniscas poco cementadas. Como sello hidráulico y térmico del yacimiento se tiene una capa de sedimentos arcillosos.

La mezcla agua vapor que se obtiene de los pozos geotérmicos se separa al pasar el flujo por un separador centrífugo tipo Webre. instalado

en la plataforma del pozo; el agua separada se envía mediante tubería de acero a la laguna de evaporación, el vapor separado se conduce a la planta termoeléctrica de 75 MW la cual es alimentada por 14 pozos.

La operación de las unidades turbogeneradoras de Cerro Prieto ha sido continua; interrumpida solamente por paros anuales para mantenimiento y limpieza.

POTENCIAL GEOTERMOELECTRICO DE MEXICO

CERRO PRIETO:

Además de los 400 MW que se tienen planeado instalar para 1983 de acuerdo con el Programa de Obras e Inversiones, se estima que podrían instalarse 2 200 MW adicionales para hacer un total de 2 600 MW.

Deberían tomarse las medidas necesarias para disponer de la energía generada por estas instalaciones, ya que el sistema actual Tijuana-Mexicali, es incapaz de absorberla, ya sea conviniendo con las empresas generadoras de energía eléctrica de los Estados Unidos un plan de intercambio (Energía entregada por el Sistema Tijuana-Mexicali por energía devuelta en el sistema Falcón-Monterrey) o bien construir líneas de transmisión de voltaje y capacidad adecuados para interconectar el sistema Tijuana-Mexicali con el de Sonora-Sinaloa y de allí con el resto del país.

ZONAS TERMALES DE JALISCO

Las estimaciones que pueden hacerse a la fecha y que incluyen las zonas de la Primavera, La Soledad, San Marcos, Los Hervores de la Vega y otras, dan un potencial tentativo de 1,300 MW, que adicionados al poten-

cial del cauce del Rfo Santiago dan un total de 2,000 MW.

ZONA TERMAL DE LOS AZUFRES, MICH.

Las estimaciones preliminares dan un potencial de 6000 MW, cifra sujeta a incrementarse tan pronto como se hagan los primeros pozos exploratorios, posiblemente triplicándose, es decir 1.800 MW.

ZONAS TERMALES DE IXTLAN Y LOS NEGRITOS, MICH.

Aunque no se ha hecho una evaluación detallada del potencial geotérmico de estas zonas, de acuerdo con las evidencias conocidas hasta la fecha, se considera factible la instalación de un total en las dos zonas de ---300 MW.

OTRAS ZONAS TERMALES DEL ESTADO DE MICHOACAN.

Comparativamente con el Estado de Jalisco, Michoacán cuenta con mayor número de Fuentes termales, evidenciando con ello un mayor potencial geotérmico, el que sin tomar en cuenta las zonas termales ya mencionadas puede estimarse en unas 1 500 MW.

ZONAS TERMALES DEL ESTADO DE GUANAJUATO.

Considerando el "corredor geotérmico" Irapuato-Salamanca, así como la Caldera (Abasolo) Comanjilla y otras, es de estimarse un potencial de 500 MW, en este Estado.

ZONAS TERMALES DE CHIAPAS.

Aunque la zona de "El Volcán" no ha sido lo suficientemente estudiada, Así se ha determinado que abarca una gran extensión, por lo que -

puede considerarse como un potencial del orden de 1, 000 MW,

En resumen, el potencial estimado en las zonas consideradas es como sigue:

CERRO PRIETO	2, 600 MW
ESTADO DE JALISCO	2, 000 MW
LOS AZUFRES, MICH	1, 800 MW
IXTLAN Y LOS NEGRITOS, MICH.	300 MW
OTRAS ZONAS DE MICHOACAN	1, 500 MW
CHIAPAS	1, 000 MW
	<hr/>
TOTAL DE ZONAS CONOCIDAS:	9, 200 MW

De las zonas termales no consideradas, de las aún no descubiertas y de la ampliación de las ya conocidas, puede estimarse un potencial semejante, es decir otros 9, 000 MW lo que dá un total estimado de 18, 200 MW capaz de ser instalado para el año 2000.

11. 5

CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

El campo geotérmico de Cerro Prieto es actualmente el único campo de explotación en México y el más ampliamente estudiado.

Desde 1961 a la fecha se han perforado 37 pozos en este campo, incluyendo los de exploración y explotación de los cuales solo 5 no han sido productores.

Los pozos de producción del campo de Cerro Prieto tienen una profundidad media de 1,300 m., producen una mezcla agua-vapor (30.6 de vapor y 69.4% de agua promedio), que se separa aproximadamente a 7.58 Kg/cm², en separadores tipo "Webre" instalados en la plataforma de los pozos.

El vapor separado se utiliza en una planta geotermoelectrica de 75MW, cuya primera unidad de 37.5 MW entró en operación en el mes de Abril de 1973 y la segunda, idéntica a la primera, en el mes de Septiembre del mismo año.

En total se tiene una producción de 2,204.9 Ton/h. de mezcla agua-vapor. La producción total de mezcla genera 683 millones de Kcal/h equivalentes a 794,138 KWH por lo que se tiene una eficiencia térmica total de 9.46%. En promedio se requieren considerando 6,000 Kcal/KWH, 30.85 Kg. de mezcla por Kwh generado, correspondiendo 9.11 Kg. de vapor y 21.74 de agua separada.

LOCALIZACION.

El campo geotérmico cuyo potencial se utiliza para el funcionamiento de la planta de Cerro Prieto, está localizado aproximadamente a

30 Km. al sur de la ciudad de Mexicali. El área actualmente en explotación y producción se extiende entre los $114^{\circ}50'$ y $115^{\circ}48'$ de longitud oeste y entre los $31^{\circ}55'$ y $32^{\circ}44'$ de latitud norte. La región, en la mitad del desierto, es una planicie sobre el delta del río Colorado. La llanura está limitada por la sierra de los Cucapá, la cuál se dirige al noroeste y termina en la colina Centinela y por las sierras El Mayor y Los Pinitos, hacia el sur. (Ver Fig. II.6.1.)

GEOLOGIA DEL CAMPO.

El resultado de los estudios geológicos y geofísicos obtenidos particularmente en los pozos y de manera general en el campo, establecen la siguiente estructura geológica. En el lado poniente del campo y a una profundidad de 2500 metros se localiza el basamento granítico, que posiblemente presenta un grado de fracturamiento muy alto ya que la zona está tectónicamente relacionada con el sistema de fallas de San Andrés, - - Sobreyaciendo el basamento y aproximadamente hasta 700 m. de profundidad se encuentran capas alternadas de areniscas saturadas de agua caliente a presión debido a la convección de calor por flujo de gas y vapores a alta temperatura a través de la roca basal fracturada. Como sello hidráulico y térmico del yacimiento se tiene sobre las areniscas y lutitas una capa de aproximadamente 700 metros de espesor de arcillas plásticas impermeables.

Geocronológicamente el basamento ígneo se considera del secundario mientras que los sedimentos abarcan el terciario y el cuaternario.

Vulcanológicamente la zona presenta trazas de su actividad volcánica en el cono del volcán apagado de Cerro Prieto y en las manifestaciones hipertermales de la Laguna Vulcano, en forma de volcanes de lodo, lagunas de agua hirviente y fumarolas.

PRODUCCION.

El flujo geotérmico obtenido de los pozos de Cerro Prieto consiste de una mezcla de agua y vapor, con una relación agua/vapor de 7.5 y una entalpía promedio de 280 calorías/ gramo. Cada pozo está provisto de un árbol de válvulas consistentes en un cabezal de anclaje, un carrete de expansión, una cruz, 4 válvulas y una junta de expansión. Para separar la mezcla de agua y vapor se encuentra instalado un separador centrífugo vertical (tipo Webre) donde la fuerza centrífuga obliga al agua a adherirse a las paredes separadoras, para después descender al fondo hacia los silenciadores, mientras el vapor, por su densidad inferior, sube en el separador y es extraído por el tubo central hacia la red de colección; en la línea de descarga del vapor de este separador se tiene una válvula de esfera cuyo objeto es impedir el paso de aguas a las tuberías de vapor. También se encuentran instalados un silenciador horizontal y un silenciador vertical de concreto con torres gemelas de madera de pino rojo.

Excepcionalmente la descarga de agua o aún de los pozos se hace a los silenciadores y en condiciones normales el agua separada se descarga por tuberías a una laguna de evaporación. La función de los silencia -

dores es reducir el ruido producido por la descarga de vapor ó agua a altas temperaturas sobre el medio ambiente.

El silenciador horizontal es de tal construcción que lleva una serie de tubos que se incrementan en diámetro y cuyo efecto es reducir gradualmente la velocidad de escape y por lo tanto disminuyen el ruido.

El silenciador vertical consiste de tubos verticales gemelos, hechos de madera, sobre una estructura de concreto, el tubo de escape del separador se conecta directamente con la estructura de concreto, donde el flujo del agua separada o de la mezcla es dividido en dos corrientes en los tubos verticales, donde por el efecto centrífugo (similar al de los separadores) el agua es separada del vapor que ha resultado de la reducción de presión que se ha llevado a cabo; el vapor sale por la parte superior al medio ambiente y el residuo de agua por la parte inferior al canal de descarga. Debido al gran diámetro de los tubos la velocidad de escape del vapor es baja y entonces el ruido producido por el escape también lo es.

CONDUCCION DE VAPOR, COLECTORES Y SEPARADORES SECUNDARIOS.

El vapor que sale de los separadores es conducido por medio de un sistema de tuberías de vapor que consiste de cuatro ramales a los que se conectan en promedio cinco pozos a cada uno. Con objeto de nivelar el flujo de todos ellos se tienen interconexiones entre los ramales, Los ramales de tuberías se conectan por parejas a los colectores de vapor, de

los cuáles salen las tuberías de alimentación para las turbinas. Todo el sistema de tuberías de conducción de vapor se encuentra aislado térmicamente y con objeto de eliminar el condensado que se forma a lo largo de las líneas de conducción se tienen trampas de vapor; ya que el vapor debe estar perfectamente seco al entrar a la turbina. (Ver fig 11. 5. 1).

Así mismo se tiene en el campo y alejado del área de la planta un sistema de regulación de presión de vapor, con escape de vapor a la atmósfera mediante la apertura de válvulas de mariposa conectadas a los ramales, disminuyendo así la cantidad de vapor que se tira en los cabezales. Para más seguridad, al entrar a la planta el total de vapor pasa por unos separadores secundarios que están entre los colectores y las turbinas con el objeto de eliminar totalmente la humedad del vapor de alimentación. Estos separadores son del tipo centrífugo con mamparas deflectoras, la presión del diseño es de 10.6 Kg/cm^2 , estando la presión de trabajo entre 5.5 y 6 Kg/cm^2 . En los colectores de vapor se tienen instaladas válvulas de alivio con objeto de permitir el escape de vapor en el caso de que las turbinas no estén trabajando a plena carga. La presión de diseño de estos colectores es de 17.5 Kg/cm^2 . y su presión de operación se encuentra entre 6 y 6.5 Kg/cm^2 .

CASA DE MAQUINAS.

El edificio para la primera etapa fué diseñado de acuerdo con los sistemas convencionales para plantas térmicas. Aquí se alojan las dos unidades turbo-generadoras de 37.5 MW cada una, así como los tableros

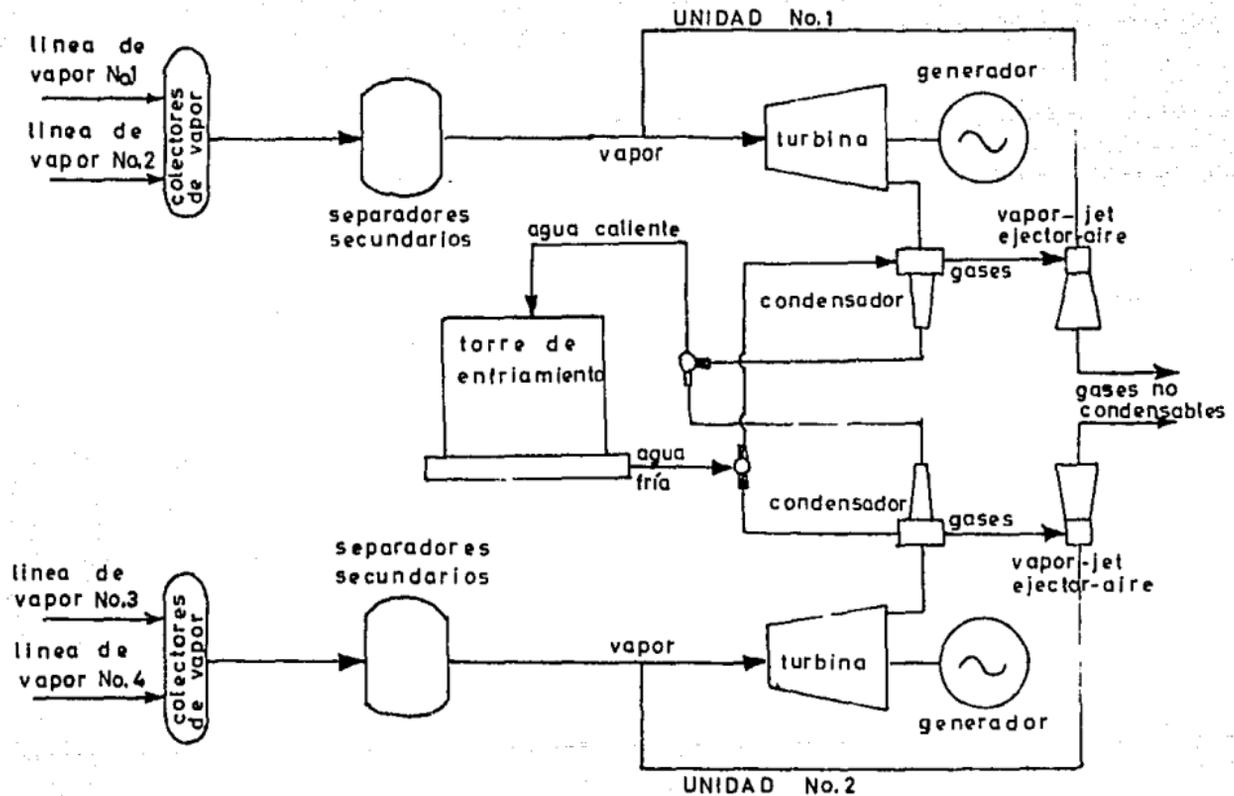


FIG. II.5.1

de control y el equipo auxiliar de enfriamiento de aceite y enfriamiento de hidrógeno y otros accesorios. Los condensadores de las máquinas son - - del tipo de mezcla con charolas interiores para un mayor contacto entre - el vapor y el agua de enfriamiento y debido a su gran tamaño se encuen - tran instalados en el exterior de la casa de máquinas. Con objeto de man - tener el vacío de las máquinas se tienen eyectores de vapor de dos pasos - con el enfriador intermedio.

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

Considerando que la zona geotérmica es desértica y que el agua disponible no llena los requisitos necesarios para usarse como medio de en - friamiento, se utiliza el mismo vapor condensado para reponer el agua de enfriamiento del sistema. Para este objeto se recircula este vapor con - densado por una torre enfriadora que tiene una capacidad de enfriamiento de $27,000 \text{ m}^3/\text{hr}$ de agua en un rango de 16°C . La torre es de madera tra - tada, de tiro inducido con flujo cruzado. El agua caliente se envía a la torre por medio de dos bombas centrífugas de flujo mixto con capacidad de $6,950 \text{ m}^3/\text{hr}$. cada una y equipadas con motores de 386 HP, el agua fría - se envía al condensador y al equipo de enfriamiento por medio de otras - dos bombas similares pero de $6750 \text{ m}^3/\text{hr}$. de capacidad y con motores - de 560 HP cada una.

PROBLEMAS DE OPERACION DE LOS POZOS GEOTERMICOS DE CERRO PRIETO.

Un pozo geotérmico consta, como se indica en la figura 11.5.2. -

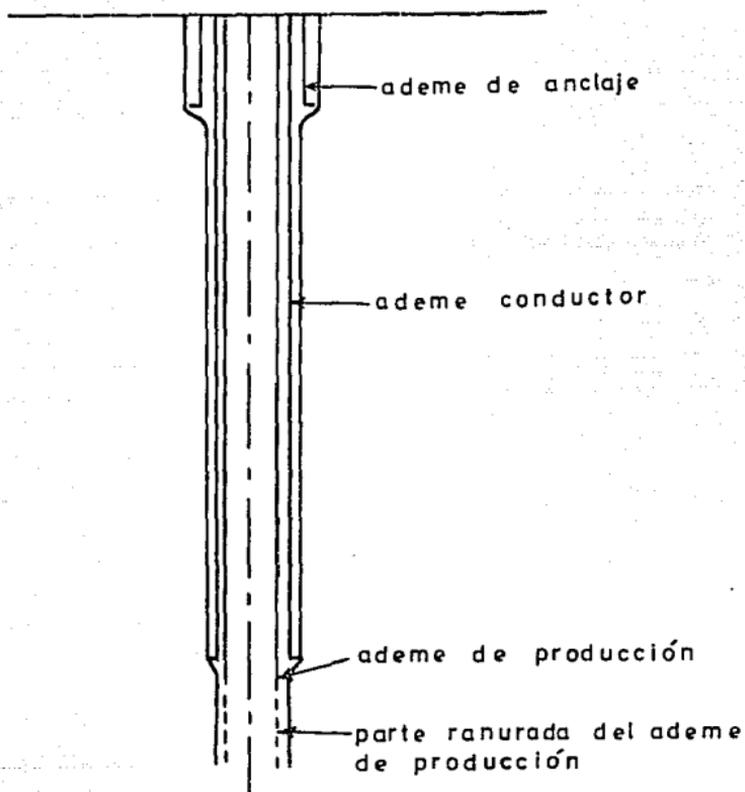


FIG.(II.5.2)CORTE DE UN POZO GEOTERMICO.

de tres tuberías que son; la de anclaje de 406 mm. de diámetro, hasta una profundidad de 150 metros, la tubería conductora de 298 mm. (11 - - 2/4") de diámetro, hasta una profundidad de 700 a 1,000 m. y la tubería de producción de 194 mm. (7-5/8 ") de diámetro, instaladas desde el fondo hasta la superficie, esta tubería tiene la parte inferior renurada para la circulación del fluido geotérmico.

ANTECEDENTES

Actualmente se tienen 16 pozos conectados al sistema de recolección y conducción de vapor, que aportan la energía para mover los dos turbogeneradores. Las dos unidades desde que entraron en servicio han operado en forma continua y solamente son paradas para darles mantenimiento preventivo. Se ha incrementado la eficiencia de los separadores y por lo tanto la pureza del vapor, por lo que la limpieza de las unidades tiende a ser cada 18 meses. La producción de algunos pozos ha tenido una gradual disminución a causa principalmente de las incrustaciones en las tuberías.

TERMINACION DE LOS POZOS GEOTERMICOS.

Los pozos de Cerro Prieto se encuentran perforados a una profundidad promedio de 1300 m. aunque hay algunos como el M-53 que esta perforado a 2000 m. En el interior de las tuberías de producción de los pozos se observa la formación de incrustaciones en los lugares donde esta cambia de diámetro de menor a mayor según las direcciones de flu -

jo, dicho fenomeno se debe a la expansión brusca que tiene como consecuencia la evaporación del fluido geotérmico saturado de Sílice (SiO_2), por lo que se ha procedido en algunos casos a instalar tuberías de producción de diámetro uniforme desde el fondo hasta la superficie. Otra práctica que se ha seguido, es la de correr un ademe ciego y perforar en forma selectiva con disparos.

La primera alternativa requiere de una cementación en dos etapas para no invadir la zona productora. La segunda alternativa presenta el problema de la temperatura que toma rápidamente el lodo en reposo sobre el cual se hacen los disparos, por lo que se requieren cables para el control de dichos disparos con aislamiento capaz de soportar altas temperaturas, además de la refrigeración con hielo del lodo de perforación.

INCRUSTACION.

En la mayoría de los pozos de Cerro Prieto, se ha detectado una disminución gradual en su producción debido principalmente a la incrustación de la tubería de producción.

La velocidad de incrustación es diferente de un pozo a otro y se ha podido observar que los pozos que explotan los estratos productores más someros son los que más pronto se incrustan, esto es debido a que el fluido geotérmico tiene en esos pozos una mayor concentración de sales de calcio. Es posible determinar la profundidad a la cual se inicia la evaporación del fluido geotérmico y por consiguiente la zona más probable en que se puede formar la incrustación, para ello se toman registros

de temperatura y presión a lo largo del pozo. En algunos casos la incrustación de los pozos puede iniciarse en la parte ranurada de la tubería de producción.

DESINCRUSTACION.

Para hacer las desincrustaciones se ha usado diferentes métodos. En algunos pozos se emplea el mismo equipo rotatorio de perforación, para lo que se usan escariadores y barrenas tricónicas; el inconveniente de este sistema, es que es necesario utilizar lodos de perforación que traen como consecuencia un enfriamiento del pozo, por lo que las tuberías son sometidas a grandes esfuerzos térmicos, además se corre el peligro de invadir la zona de producción con los mismos lodos, lo que puede originar su oclusión parcial ó total. En otros pozos se ha usado equipo de percusión, equipo que puede llevar a cabo la operación sin disminución de temperatura, utilizando el propio flujo del pozo para levantar los cortes, el inconveniente de este método es que el equipo para barrenas (de 127 mm. a 460 mm.) no es adecuado para profundidades mayores a 450m. y que no se puede girar la barrena en caso de atascamiento. También se hace la limpieza a base de chorros de agua a alta presión pero se ha logrado muy poco éxito con este método. A la fecha se está considerando el empleo de un equipo que no requiera enfriar el pozo, que no tenga limitaciones de profundidades y que ofrezca menos peligro de perder la barrena por atascamiento, este equipo usa para la perforación aire y está acondicionado con prevensores rotatorios y tubos sopladores que su

ministran el flujo de aire para ayudar a sacar los cortes.

Otros problemas que se presentan son debidos a que se han utilizado tuberías con roscas Buttress y que por cambios bruscos de temperatura han llegado a fallar.

También se ha tenido el problema del colapso de las tuberías al producirse los cambios de temperatura, lo que ha provocado el uso de tuberías de mayor espesor.

T A B L A 11.5.1

COSTO DE KWH POR CONCEPTO DE VAPOR (PESOS DE 1975)

Costo de los pozos y sus instalaciones	\$80'000,000.00
----------------------------------------	-----------------

Costo año 1975

Costos fijos (intereses, amortización, depreciación de capital, etc). - - - - -	\$21'916,936.00
------------------------------------------------------------------------------------	-----------------

Costo de Operación (1975) - - - - -	<u>\$15'782,295.49</u>
-------------------------------------	------------------------

Costo Total	\$37'699,231.49
-------------	-----------------

Vapor separado (1975) - - - 5,099,577.6 Ton.	
----------------------------------------------	--

Costo Tonelada vapor - - 37,699,231.49 =	\$ 7.25
------------------------------------------	---------

Costo Kg vapor - - - - -	\$ 0.00725
--------------------------	------------

Costo del KWH por concepto de vapor	
-------------------------------------	--

(A 9.11 Kg/KWH)- - - - -	\$ 0.066
--------------------------	----------

NOTA: Se ha calculado el costo de Kg. de vapor considerando únicamente la producción de vapor separado en una etapa de flasheo; es posible la utilización del agua separada del primer flasheo en otra etapa de baja presión, mediante la cual se podrá incrementar la capacidad y generación del agua, permitirán reducir el costo del Kg. de un 20%, con la correspondiente reducción del costo del KWH generado.

T A B L A 11.5.2.

PLANTA GEOTERMoeLECTRICA CERRO PRIETOGENERACION UNIDADES 1 y 2

Entrada en operación comercial.

Unidad # 2 Abril de 1973

Unidad # 1 Sept. de 1973

Generación:

Año 1973 Unidades 1 y 2 205×10^6 KWH

Año 1974 Unidades 1 y 2 445×10^6 KWH

Año 1975 Unidades 1 y 2 518×10^6 KWH

TOTAL - - - - $1,168 \times 10^6$ KWH

Factor de Planta anual:

Año 1973 - . -

Año 1974 0.68

Año 1975 0.79

Máximo factor de planta mensual de Unidades 1 y 2:

0.94 Septiembre de 1975

Máximo factor de planta mensual por unidad:

1.0 Unidad # 2 Noviembre de 1975.

NOTA; Se puede apreciar que desde su arranque inicial las dos unidades han tenido un aumento sistemático en la generación de energía eléctrica en este período.

T A B L A 11.5.3.

COSTOS DE LA PLANTA GEOTERMoeLECTRICA DE CERRO PRIETO

DE 75,000 KW(PESOS DE 1975)

Costo de la planta Geotermoelectrica

Unidades 1 y 2 \$ 504'750,000.00

Costo Anual

Costos fijos (intereses, amortización

depreciación de capital, etc. - - - - \$ 71'150,418.00

Costos operación planta (1975) - - - \$ 14'227,493.52

Costos operación campo (1975) - - - \$ 15'782,295.49

Costo Total (1975) - \$ 101'160,207.01

Generación bruta 518,382.498 KWH

Generación neta 491,358,598 KWH

Costo del KWH instalado - - - - - $\frac{504,750.00}{75,000} = \$ 6,730.00$ Costo del Kilowatt Hora Bruto - - - - $\frac{101,160.207}{518,382.498} = \$ 0.195$ Costo de Kilowatt Hora Neto - - - - $\frac{101,160.207}{491,358.598} = \$ 0.205$

NOTA: La generación bruta (518,382,498 KWH), representó un ahorro de 1 millón de barriles de combustible.

11.6.

PROBLEMAS AMBIENTALES

DISPOSICION DE DESECHOS

Los sistemas geotérmicos actualmente en explotación en el mundo son: los denominados de predominio de agua y los de predominio de vapor. En los primeros la disposición de desechos es más complicada, debido a que se tienen como contaminantes principales, la salmuera y los gases de desecho; en los segundos se tienen únicamente como contaminantes principales los gases.

La disposición de la salmuera varía dependiendo del medio y restricciones de contaminación existentes en el área, pudiendo colocarse en lagunas de evaporación, reinyectarse al terreno ó enviarse al mar.

La disposición de los gases, cuyo contaminante principal es el H_2S , puede resolverse con dispersión a gran altura cuando su contenido es bajo ó mediante conversión a azufre ó sulfatos cuando su contenido es elevado ó cuando las restricciones sobre contaminación ambiental son muy estrictas.

Los contaminantes principales de los dos tipos de sistemas geotérmicos se exponen en la tabla 11.6.1.

Aunque el volúmen de gases nocivos producidos por una planta geotérmica es mucho menor que los producidos por una planta de combustible fósil ó nuclear es necesario disponer adecuadamente de ellos y de la manera más-económica.

Excepto por la manera en que se regresa el fluido al reservorio geotérmico, los dos métodos de producción de electricidad actualmente en explotación han demostrado ser exitosos en sus conceptos básicos. El problema reside en el hecho de que durante la reinyección de las aguas calientes geotérmicas estas contienen sales disueltas que se pueden precipitar cuando hay ba-

T A B L A 11.6.1.

C O N T A M I N A N T E S	S I S T E M A S C O N P R E D O M I N I O D E A G U A.	S I S T E M A S C O N P R E D O M I N I O D E V A P O R
1.- Elevado gasto agua con elevado contenido de sales	Na,K,Li,Cl,SO ₄ , HCO ₃ ,SiO ₂ , B, As, Hg, etc.	no se tiene
2.- Bajo gasto de agua bajo contenido de sales	Hg,As,B, etc.	Hg, As, B, etc.
3.- Gases (flujo elevado)	CO ₂ ,H ₂ S, NH ₄ .etc.	CO ₂ ,H ₂ S, NH ₄ ,etc.
4.- Ruído	Se tiene	Se tiene
5.- Calor	Se tiene	Se tiene
6.- Alteraciones del terreno	Se tienen	Se tienen

las presiones y temperaturas lo que puede reducir la porosidad ó rellenar las fisuras del reservorio. El resultado neto puede ser un decremento en la permeabilidad y en la capacidad de aceptación de más fluido que se le quiera reinyectar, lo que produce un inevitable detrimento en la productividad.

En la planta de vapor seco donde el vapor del reservorio es de alta pureza, la reinyección se practica en forma muy eficiente, en este caso el vapor condensado que se inyecta es esencialmente agua destilada y contiene solamente unas pocas partes por millón de sales.

Una ventaja del ciclo de vapor-turbina es que no hay gases no condensables de desecho, el fluido esta contenido en condiciones de presión que no permiten que se expanda en ningún momento, sin esta necesidad de expansión el nivel de ruido es mucho más bajo que el producido por el método de calentamiento de agua.

Una gran desventaja del ciclo de vapor-turbina es la necesidad de una fuente suplementaria de agua de enfriamiento, pues no hay disponible vapor condensado directamente.

SOLUCION PRESENTE Y FUTURA DE LA CONTAMINACION DE LOS DESECHOS GEOTERMICOS.

En los sistemas de explotación de los Geysers en Estados Unidos, que son del tipo vapor dominante; dicho vapor tiene un contenido promedio de 220 partes por millón de H_2S , aparte de otros gases; estos después de pasar por la turbina se envían directamente a la atmósfera a través del sistema de eyectores de gases, así como por arrastre de vapor y aire en la torre de enfriamiento. Debido a que se ha incrementado grandemente la explotación (602 MW)

y a que la reglamentación ambiental es cada día más estricta, se tiene programado bajar en un 93% la emisión de H_2S a la atmósfera para lo cual se piensa eliminar el sulfídrico que se disuelve en el agua de enfriamiento utilizando catalizadores de oxidación tales como, sales de fierro, las cuales provocan la precipitación de azufre antes de aerear el agua de la torre. Las técnicas actuales de eliminación de gases de esta planta son de costo elevado, sin embargo se requiere efectuarlas, ya que si no se controla la emisión de H_2S , este se descargaría a la atmósfera a razón de 33000 Kg/día, actualmente se tiene programado reducir esta emisión a 3600 Kg/día para una generación de 602 MW en forma continua.

Cuando las restricciones no son muy estrictas, en los sistemas con predominio de vapor, para evitar la contaminación, se efectúa la reinyección y no solo evita ésta sino que además favorece la expansión, al tenerse una carga en el acuífero, como es el caso de Larderello, Italia.

En los campos de Wairakei, Nueva Zelanda, el contenido de gases de desecho a través del sistema de eyectores, al generar 190 MW, causa cierta contaminación, sin embargo no representa problema ya que la planta esta en un espacio abierto con vientos constantes que dispersan el H_2S , además, no se tiene torre de enfriamiento debido a que se usa el agua de un río para el sistema, disolviéndose un buen porcentaje de gases en dicha agua.

Actualmente se hacen pruebas piloto, para eliminar el sílice y el arsénico en caliente, con el fin de poder utilizar la energía del agua del río o disponer de ella adecuadamente después de tratarla.

El agua separada caliente de 500 a 1000 partes por millón de SiO_2 y -

de 3 a 5 partes por millón de As. En pruebas a escala piloto, estos elementos se están extrayendo agregando cal, polimerizándose el sílice y precipitando en forma de gel un silicato hidratado de calcio que se separa fácilmente en tanques de reposo. El arsénico se oxida pasando el estado pentavalente, coprecipitándose la mayor parte. El producto resultante una vez sacado puede utilizarse como material aislante y de construcción.

En el campo de Cerro Prieto, México, se explota un sistema con predominio de agua. De los 32 pozos perforados hasta la fecha operan 16 y producen 770 ton/hr. de vapor separado, desechándose 1870 ton/hr. de agua separada. Los contaminantes principales son el agua separada caliente con elevado contenido de sales (Tabla 11.6.2.) que representa el 70% del fluido geotérmico extraído por los pozos de producción y un elevado porcentaje de gases presentes en el vapor separado que se utiliza en la planta de generación (Tabla 11.6.3.).

Actualmente las 1870 ton/hr. de agua separada se envían directamente de los pozos a una laguna de evaporación (Fig. 11.6.1.) a través de tuberías de acero al carbón de 8 y 10 pulgadas de diámetro. Dicha laguna, tiene una extensión de 8 Km² y un tirante máximo de 1.8. m, con una capacidad de almacenamiento del orden de 6 millones de m³.

Debido a la elevada evaporación que se tiene en el área (2000 mm/año) y a la baja precipitación pluvial, se ha tenido la suficiente capacidad de almacenamiento para desechar el agua al generarse los 75 MW de capacidad instalada de 1973 a la fecha.

Con el fin de mantener un grado de salinidad bajo en la laguna de eva-

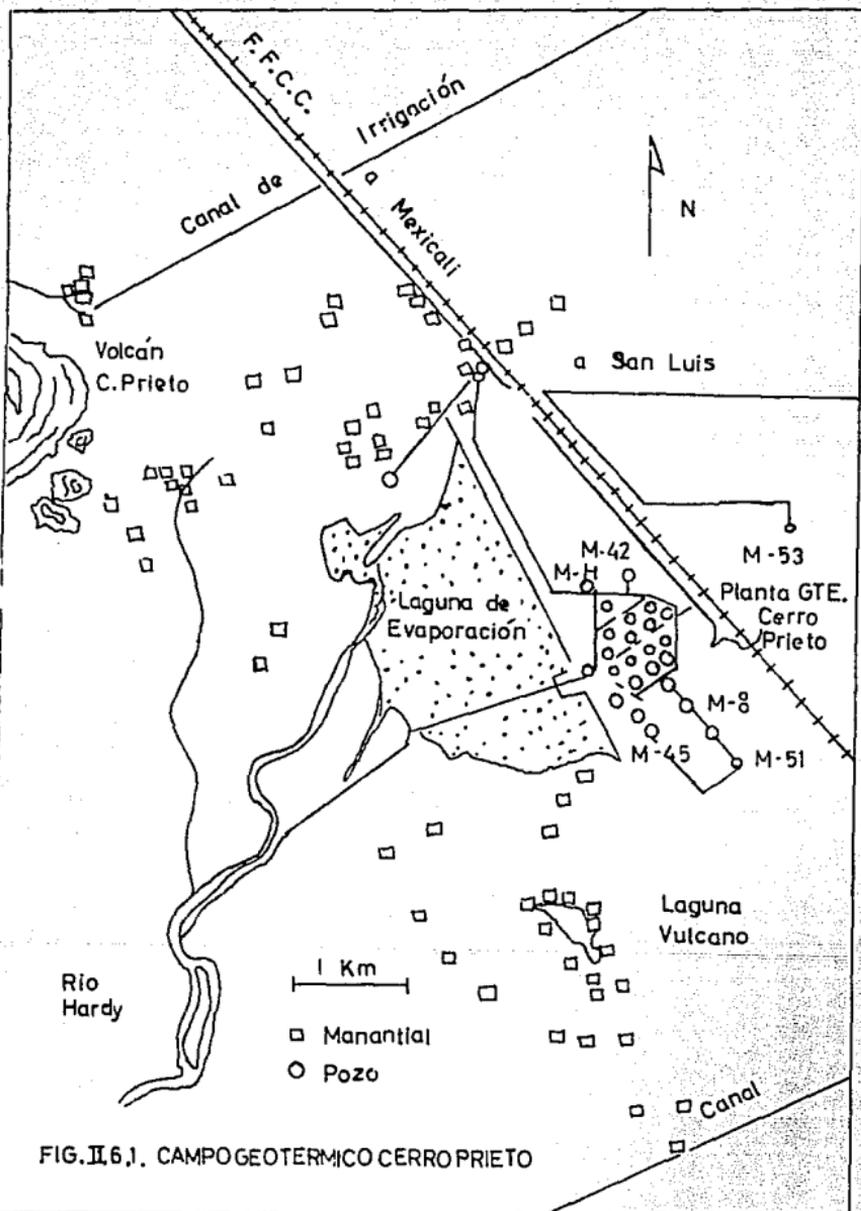


FIG. II.6.1. CAMPO GEOTERMICO CERRO PRIETO

T A B L A 11.6.2.

COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SEPARADA DE LOS POZOS DE CERRO PRIETO

Pozo No.	Fecha Muestreo	Presión. Psig.	Presión.											
			Na	K	Li	Ca	CL	B	CO ₃	HCO ₃	SiO ₂	As	F	NH ₄
**M	12/72	3	4175	575	11	212	7470	8	0	62	285			
**M	8/12	200	5875	1812	15	381	11261	11	13	64	507			
**M5	6/73	300	8300	2210	27	521	16431	15	6	44	864	0.5	2	21
**M6	10/72	10	4375	475	17	552	8141	6	0	886	162			
**M7	11/72	71	5800	1175	16	316	10258	14	8	197	530			
*M8	6/73	232	7999	2125	24	427	15884	18	5	74	1218		2.5	20
M9	6/73	100	6331	1067	17	447	11459	11	8	65	495			
**M10	12/72	197	5500	1487	17	232	9910	14	13	179	675			
**M11	6/73	578	8281	1987	18	494	15965	17	0	59	870			
M13	6/72	148	8775	2200	26	448	16254	11	27	27	880			
**M15	3/69	315	5375	1587	-	260	9604	7	0	19	1231			
*M15A	1/75	212	6000	1125	15	321	11600	9	24	19	678	0.5	2.2	23
*M19A	2/75	415	8040	2124	20	547	16750	-	-	-	967			
M20	1/74	120	7100	1620	15	510	12800	13	5	58	800			
**M21	10/72	610	5525	1725	18	304	11437	10	13	106	675			
*M21A	4/74	280	5803	1628	14	318	10301	-	-	-	804			
**M25	1/74	105	8650	2000	23	585	16900	-	-	44	900			
*M26	1/74	92	9050	2200	20	840	16800	-	-	40	1000	2.2	3.2	24
*M29	2/74	90	6450	1200	15	480	12100	13	16	55	500			
*M30	1/74	116	8500	1980	22	585	16400	-	-	36	950			
*M31	1/74	274	7700	1930	20	500	15400	14	11	48	850		1.4	
M34	2/74	86	7100	1200	18	645	13100	11	0	48	600			
*M35	3/74	290	9459	2557	20	545	17064	-	-	-	-			
M38	10/72	540	7050	1900	23	360	13984	15	8	58	755			
*M30	2/74	90	6100	1080	14	455	11300	15	30	60	650			
**M51	4/74	340	6180	1905	16	302	11184	-	-	-	785			
**M53	11/74	1088	7843	2742	-	341	16488	-	-	-	1441			

* Pozos en operación (sept. 76)

** Muestreo efectuado descargando por purga un pequeño flujo.

T A B L A 11.6.3

CONTENIDO DE GASES EN VAPOR SEPARADO

POZO No.	FECHA MUESTREO	CO ₂ ppm	H ₂ Sppm
M5	751120	12848	1521
M8	751125	12908	1312
M9	751208	16130	1226
M15A	751218	24877	2064
M19A	751209	12120	1554
M20	751202	12584	1869
M21A	751201	14388	1533
M25	751208	13088	1404
M26	751127	13312	1431
M30	751128	10360	1463
M31	751126	18176	1638
M34	751129	14414	1721
M35	751202	9104	1482

Análisis efectuado por yodometría y potenciometría.

poración se han efectuado descargas controladas de agua del orden de 200 litros por segundo al río Hardy a partir de 1975. Este río, que nace en la zona geotérmica, maneja principalmente aguas de drenaje del distrito de riego del Valle de Mexicali, el cual descarga su flujo en la laguna Salada (lago seco que cubre una gran extensión desértica), la salinidad del río oscila entre 3000 y 6000 partes por millón dependiendo de la época del año y maneja flujos del orden de $20 \text{ m}^3/\text{seg.}$

La contaminación por mercurio en Cerro Prieto es muy baja; los estudios hechos para conocer el contenido de mercurio, indican que el 90% de Hg. que entra con el vapor es descargado a la atmósfera en una cantidad del orden de 5.4 gramos por hora al generarse 75 MW, el resto se envía al drenaje en el derrame de la torre de enfriamiento. Del mercurio que entra a la planta, el 80% se diluye en el agua de enfriamiento y posteriormente se libera a la atmósfera en la torre y 20% se descarga a través del sistema de eyectores, con los gases no condensables.

Casi un 90% de arsénico se encuentra en la fase líquida del fluido geotérmico por lo tanto se encuentra disuelto en el agua separada que se envía a la laguna, El contenido varía de 500 a 2200 ppb, la fase vapor contiene únicamente 6 ppb. al generarse 75 MW. En dicha laguna se descargan alrededor de 2500 grs. de arsénico en forma de As^{+3} As^{+5} . En la planta se desechan únicamente del orden de 4.5 grs. por hora a través del agua de derrame de la torre de enfriamiento.

Los contaminantes principales por su elevado porcentaje de gases son el CO_2 , H_2S y NH_4 (Tabla 11.6.3.). A la entrada de las turbinas de las --

unidades en operación se tienen en el vapor 14100 ppm. de CO_2 , 1500 ppm. de H_2S y 110 ppm. de NH_4 . Al estarse generando 75MW entran a la planta del orden de 1100 Kg/hr. de H_2S desechándose a la atmósfera del orden de 90%. Los gases se descargan a una altura de 40 m, con lo cual se disminuye principalmente el H_2S en la casa de máquinas.

Al aumentar la generación de energía a 150 MW ó a 400 MW para 1983, se tiene programado reinyectar el agua separada. Esto se efectuaría en la zona poniente del campo al borde de la laguna de evaporación. Debido al elevado contenido de sílice y a los problemas de incrustación se estudia la factibilidad de reinyectar el agua de desecho después de provocar precipitación y asentamiento del sílice. De ser positiva la reinyección en caliente, se tendría un mejor aprovechamiento de ese recurso y una mayor vida del reservorio.

Por otro lado recientemente se ha despertado gran interés en el aprovechamiento de las sales disueltas en el agua separada, principalmente el cloruro de potasio, utilizado ampliamente en la agricultura y que actualmente se importa en su totalidad.

IMPACTO SOBRE LA TIERRA

Los asentamientos y efectos sísmicos son efectos potenciales en el desarrollo de las plantas geotérmicas. Decimos potenciales porque ni en Larderello que lleva 60 años operando, ni en los Geysers que lleva 12 años, se han observado estos efectos. Aunque estos fenómenos se han visto en algunos campos petroleros y bajo circunstancias especiales, no hay razón para relacionar estos problemas con las plantas geotérmicas, donde las condicio-

nes geológicas son muy diferentes, en lo que a campos de vapor seco se refiere, pero en los campos de agua caliente sí podría existir este problema.

En los campos de agua caliente existen otras condiciones, las cuales son similares a las de los campos de petróleo y a menos que la presión no se mantenga constante mediante la inyección de algún fluido puede haber asentamiento. Esto ocurre en Wairakei, N. Z., donde el agua no se regresa al reservorio. Debido a la experiencia que se tienen en campos de petróleo, los problemas que surgen en los campos de agua caliente pueden tener una solución satisfactoria mediante la reinyección.

A la fecha no hay evidencias de que la explotación de un reservorio geotérmico haya aumentado la actividad sísmica del área en donde se encuentre.

II. 7.

**PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA
ENERGIA GEOTERMICA**

PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA ENERGIA GEOTERMICA

Entre las perspectivas futuras de este tipo de energía se puede tener: el aprovechamiento de aguas salinas utilizándolas para la producción de agua potable aprovechando el vapor geotérmico de las turbinas; y la recuperación de productos químicos tales como el cloruro de sodio, cloruro de potasio, carbonato de litio y azufre, que se encuentran disueltos en sus pensión en el agua separada del vapor.

Estos productos pueden ser utilizados en numerosas aplicaciones, - por ejemplo, el cloruro de sodio es utilizado en la refrigeración, el cloruro de potasio como fertilizante, el carbonato de litio para la fabricación - de grasas lubricantes y el azufre para la obtención de ácido sulfúrico.

Los laboratorios Pacific Northwest, una división del Instituto Batella Memorial, Richland Wash, condujeron un estudio que examina la posibilidad de usar la energía atómica para desarrollar los recursos geotérmicos de -- las naciones. La idea consiste en usar la energía de la roca seca caliente, triturándola por medio de una explosión nuclear, para producir una cavidad grande que esté llena de roca rota caliente, de la cual el calor pueda ser - extraído. La extracción de calor es lograda perforando un segundo pozo a través del cual se le inyecta agua al fondo de la cavidad. El vapor sobreca lentado resultante, de alta presión y de alta temperatura es sacado por la - parte superior de la cavidad y usado para impulsar un turbo-generador, -- luego es condensado y regresado a la cavidad.

Ya que la detonación es profunda, los científicos opinan que no ocu-- rrirá ninguna emisión externa de radioactividad; la mayoría de los produc-

tos fisiónados permanecerán estancados en la roca derretida o fundida de la pared de la cavidad. Pero muchas personas dedicadas al estudio de la geotermia dicen que como la fracturación de la roca caliente es un requerimiento clave para el proceso, los científicos deben desarrollar otros métodos para fracturar la roca sin recurrir a la energía atómica, como puede ser el provocar la fractura por medio de dispositivos hidráulicos.

El laboratorio científico de Los Alamos California, está llevando a cabo un proyecto de investigación para el aprovechamiento de la extracción de la energía de rocas calientes, Rocas secas a 200 grados centígrados -- han sido descubiertas a tres Kilómetros de profundidad y completamente -- fracturadas, este aprovechamiento se muestra en la Fig. (11.7.1.). Se trata de realizar dos perforaciones por medio de un dispositivo hidráulico en la zona de rocas calientes y por una cavidad introducir agua y por la -- otra obtener vapor, el cual puede ser aprovechado para generar electricidad.

Otra fuente de energía geotérmica que parece prometer mucho consiste de depósitos de agua caliente altamente presurizados que contienen -- metano disuelto. Estos son localizados sobre una amplia área en la costa del Golfo de México, a una profundidad de cuatro a seis kilómetros, el problema aquí es que cada zona geopresurizada soporta el sobrepeso de las -- rocas superiores, así que la extracción puede producir el asentamiento -- del terreno.

Actualmente se están elaborando proyectos que utilicen los reservorios de agua caliente, existen dos métodos para la producción de electricidad.

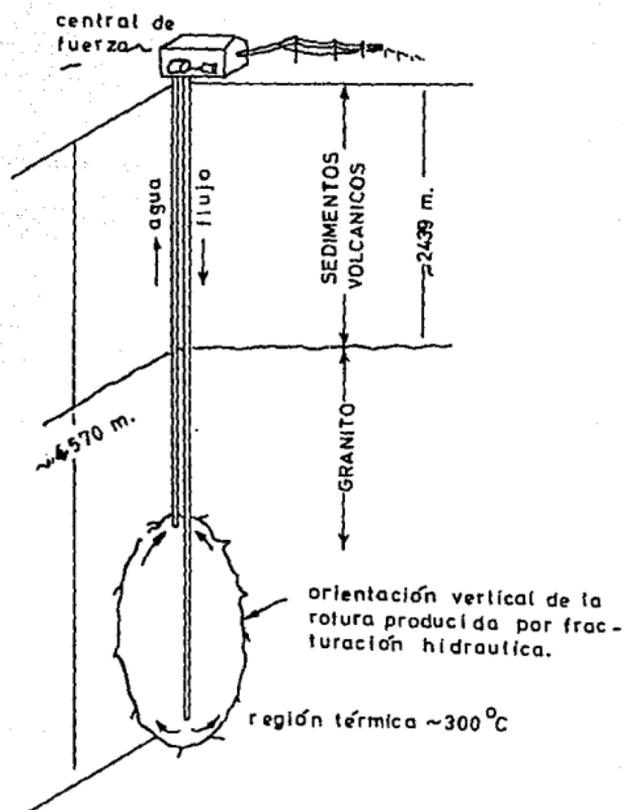


FIG.(II.7.1) DIAGRAMA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE ENERGIA GEOTERMICA DE ROCA SECA CALIENTE DESARROLLADO POR FRACTURACION HIDRAULICA.

cidad en las plantas de agua caliente. Uno de ellos es convertir el agua ca-
liente en vapor a bajas presiones y luego tratarla de la misma manera que
en las plantas de vapor seco, este método se utiliza con éxito en México y
Nueva Zelanda. El otro método consiste en utilizar intercambiadores de
calor usando un líquido de trabajo separado en la turbina.

Debido a que la entalpía del agua caliente es más baja ambos méto-
dos requieren de mayor fluido en la superficie por KWH de electricidad ge-
nerado que los sistemas que utilizan vapor seco.

BIBLIOGRAFIA

ENERGIA SOLAR

1. - PRESENT STATE AND PERSPECTIVE OF SOLAR ENERGY APPLICATIONS IN MEXICO.
Dr. ERIC R. MAYER
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES, FACULTAD DE INGENIERIA.
UNAM, AGOSTO 1976.
2. - OUTLOOK FOR NEW NUCLEAR ENERGY SOURCES IN THE U. S. A.
J. A. LANE
I. A. E. A. BOARD ROOM MAY 1976.
3. - POLITICA DE ENERGETICOS EN LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.
ING. ODON DE BUEN LOZANO. 1976
4. - ENERGY BOOK # 1
NATURAL SOURCES AND BACKYARD APPLICATIONS.
EDITED BY JOHN PRENIS.
5. - SOLAR HEATING AND COOLING
ENGINEERING, PRACTICAL DESIGN AND ECONOMICS.
JAN F. KREIDER AND FRANK KREITH.
1975.
6. - CALENTADORES SOLARES PARA USO DOMESTICO.
INFORME DEL INSTITUTO DE INGENIERIA, U. N. A. M.
1975.
7. - ENERGIA SOLAR
WILLIAN W. EATON. 1974.
8. - USO DIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR
FARRINGTON DANIELS. 1974.
9. - TERMODINAMICA
FAIRES
UTEHA. NOVIEMBRE 1967.
10. - SOLAR COOLING
S. B. SZOKOLAY, UNIVERSIDAD DE QUESLED.
ABRIL, 1975. REVISTA 1
11. - SMALL TURBINE FOR SOLAR ENERGY POWER PACKAGE.
ARTICULO DE UNA CONFERENCIA DE NUEVAS FUENTES DE ENERGIA (1964)
AUTORES: TABOR H. AND BRONICKI.

12. - ELECTRICIDAD SOLAR.
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
AUTORES: ING. RAUL DE LA PARRA.
FIS SALVADOR GARCIA.
1976.
13. - UNA PROPUESTA PARA UN ESFUERZO CONJUNTO ENTRE LA INDUSTRIA,
LA UNIVERSIDAD Y LAS COMPAÑIAS DE FUERZA MOTRIZ SOBRE LA CON-
VERSION TERMICA DE LA ENERGIA SOLAR PARA LA PRODUCCION DE --
POTENCIA ELECTRICA.
A. B. MEINEL.
OPTICAL SCIENCES CENTER.
UNIVERSITY OF ARIZONA. ABRIL, 1971.
14. - NATIONAL FOTOVOLTAIC CONVERSION PROGRAM.
LEONARD MAGID. ERDA. WASHINGTON, USA. 1972.
15. - PERSPECTIVAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN EL MEDIO
RURAL MEXICANO EMPLEANDO CONVERTIDORES DIRECTOS DE ENERGIA
SOLAR.
DEL VALLE Y PEREZ
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.
VII BIENAL DEL CIME. 1976
16. - L' UTILIZATION DE L "ENERGIE SOLAIRE: UN NOUVEAU DE PART.
W. PALZ.
REVUE FRANCAISE DE L' ELECTRICITE, 1976.
17. - ENERGIA ELECTRICA EOLICA.
J. L. MIRAMONTES ROJAS.
VII BIENAL DEL CIME, 1976.
18. - ES NECESARIO APROVECHAR LAS NUEVAS FUENTES DE ENERGIA.
J. L. MIRAMONTES ROJAS.
EL HERALDO, 25 DE NOVIEMBRE DE 1976.

II ENERGIA GEOTERMICA

1. - PERSPECTIVAS PARA LAS NUEVAS FUENTES DE ENERGIAS NO NUCLEARES EN U. S. A.
POR J. A. LANE.
I. A. E. A. BOARD ROOM MAYO, 1976.
2. - POSIBILIDADES GEOTERMoeLECTRICAS EN MEXICO.
ING. JORGE GUIZA LAMBARRI. 1976.
3. - GEOTHERMAL ENERGY.
EDITED BY PAUL KRUGER AND COREL OTTE
RESOURCES, PRODUCTION, SIMULATION.
STANFORD UNIVERSITY PRESS, 1973.
4. - ENERGIA GEOTERMICA.
D. E. WHITE. 1973.
5. - POLITICA DE ENERGETICOS DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
ING. ODON DE BUEN LOZANO.
VII BIENAL DEL CIME, 1976.
6. - ESTADO ACTUAL DE LA ENERGIA GEOTERMICA EN MEXICO.
R. DE LA PARRA.
SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ENERGIA GEOTERMICA EN LA AMERICA LATINA.
GUATEMALA, OCTUBRE 1976.
7. - PLANTA GEOTERMoeLECTRICA DE CERRO PRIETO.
CFE. BOLETIN DE LA C. F. E.
8. - CERRO PRIETO. UNDERGROUND POWER
BOLETIN DE LA C. F. E.
9. - PROBLEMAS EN LA OPERACION DE LOS POZOS GEOTERMICOS DE CERRO PRIETO.
J. GUIZA
SIMPOSIO. GUATEMALA, 1976
10. - DISPOSICION DE DESECHOS GEOTERMICOS.
S. MERCADO.
SIMPOSIO. GUATEMALA, 1976.
11. - ENERGIA GEOTERMICA. POTENCIAL MINIMO DE GENERACION ELECTRICA.
GARCIA DURAN S. (1976) C. F. E.
12. - ESTUDIO GEOELECTRICO DE LA ZONA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO.
GARCIA DURAN S. (1976) SAN FCO. CAL. USA.

13. - EVALUACION PRELIMINAR DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE MEXICO
MERCADO S. 1975. C. F. E.
14. - ARTICULO: LA ENERGIA GEOTERMICA. - SEGUNDA PARTE.
Dr. ING. GIANCARLO FACCA.
REVISTA MEXICANA DE ELECTRICIDAD, MAYO DE 1967.