

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Quimica

ESTUDIO DE AUTOSUFICIENCIA ENERGETICA DE UNA CASA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a n :

FRANCISCO LUTTMANN VALENCIA

SERGIO LUNA PLATAS

SATURNINO AGUILAR GONZALEZ

MEXICO, D. F.

1976

282



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

TESIS
1976
M-12

PRESIDENTE: PROF. LUIS E. MIRAMONTES

VOCAL: PROF. JOSE LUIS PADILLA DE ALBA

SECRETARIO: PROF. CLAUDIO AGUILAR MARTINEZ

1er. SUPLENTE: PROF. RAMON ARNAUD HUERTA

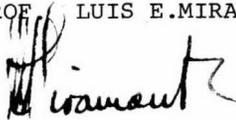
2do. SUPLENTE: PROF. JOSE LUIS HERCE VIGIL

Sitio donde se desarrolló el tema: FACULTAD DE QUIMICA

Nombre completo y firma del sustentante: SATURNINO AGUILAR GONZALEZ

Nombre completo y firma del asesor del tema:

PROF. LUIS E. MIRAMONTES

A handwritten signature in black ink, appearing to read "L. E. Miramontes", is written over the typed name. The signature is stylized and somewhat cursive.

A nuestros padres

Con cariño y agradecimiento

INDICE GENERAL

Página

INTRODUCCION.	1
RESUMEN.	10
CONCLUSIONES	12
CAPITULO 1. ENERGIA SOLAR.	18
1.1. Transformación de la Energía Solar en Energía Eléctrica.	19
1.1.1. Generación de Electricidad a Partir del Efecto Foto-eléctrico.	20
1.1.2. Generación de Electricidad a Partir del Efecto Termo-eléctrico.	32
Bibliografía.	49
1.2. Captación de la Energía Térmica Solar..	50
1.2.1. Análisis y Diseño de un Sistema Calefactor Solar para - Agua de Servicio.	51
1.2.2. Acondicionamiento de Aire y Calefacción Solares	167
Referencias.	171
Bibliografía.	173
CAPITULO 2. ENERGIA EOLICA.	175
2.1. Introducción.	176
2.2. Aprovechamiento de la Energía Eólica a Través de la Historia	178
2.2.1. Aprovechamiento Directo de la Energía Eólica.	178
2.2.2. Transformación de la Energía Eólica en Energía Mecánica	181
2.2.3. Transformación de la Energía Eólica en Energía Eléctrica.	185
2.3. Posibilidad de Aprovechamiento de la Energía Eólica para lograr la Autosuficiencia Energética de una Casa.	194
2.3.1. Molinos de Viento.	196
2.3.2. Generadores Eléctricos de Viento	199
Bibliografía	201

INTRODUCCION

El mundo de hoy es un mundo que se reduce en tiempo cada día más - debido a la rapidez de las comunicaciones y por lo tanto, en razón de esa - rapidez, las investigaciones van cada día más aprisa.

Asi nacieron las máquinas de vapor sustituyendo la fuerza de los - músculos humanos y animales de carga, más tarde fuerzas hidráulicas, poco - después, la energía eléctrica. A la par de ello fue el hombre dándose cuen - ta de las diferentes formas de energía: energía calorífica, mecánica, quími - ca, nuclear, solar, eólica.

Termodinámicamente, la energía se define como la capacidad para - efectuar un trabajo. Este trabajo se realiza en nuestra sociedad, en un al - to porcentaje, a base de la explotación y consumo de los combustibles natu - rales no renovables, como son el petróleo, el carbón mineral y en menor gra - do, el gas natural.

Desde la revolución industrial, los países altamente industriali - zados han entrado a una carrera donde el mayor consumo de energía implica - tener un alto potencial económico que proporciona una buena base de dominio político. Sin embargo, el incremento en el consumo de energéticos ha crea - do grandes alteraciones sociales y ecológicas. Esta situación ha ocasiona - do dos problemas muy complejos y difíciles de *solucionar, que se encuentran*

íntimamente ligados. Estos problemas son, por un lado, que los combusti---bles naturales no renovables están desapareciendo a un paso vertiginoso, ya que las instituciones creadas por la sociedad y que hacen posible nuestra existencia (medicina, industria de transformación, transporte, etc.) son al tamente dependientes en cantidades cada vez mayores de ellos, lo que se dejó ver claramente en la crisis energética internacional de los años 1973- -1974 debida al embargo petrolero de los países árabes. Por otro lado, el uso de los combustibles convencionales genera la contaminación ambiental - en un gran porcentaje, llegado a tal grado en algunos lugares, que se detec tan trastornos en la salud de los seres humanos que las habitan.

Esto ha dado lugar a la investigación de nuevas fuentes de ener--gía.

Ocupa lugar preponderante la energía nuclear tanto por fisión como por fusión, a pesar de sus todavía graves problemas, por ser una fuente-productora de energía continua a gran escala.

El proceso para obtener energía nuclear por fisión crea materia--les de desecho radioactivos difíciles de eliminar del medio ambiente. La energía liberada en este proceso es mayor a la que se puede utilizar, por lo que el sobrante se tiene que eliminar en forma de calor al medio ambiente, principalmente al aire y al agua, que tienden a alterar la ecología.

El proceso de fusión nuclear como fuente de energía, aun en desarrollo, presenta problemas tecnológicos difíciles a causa de la extremamente alta temperatura de operación requerida. Dichos problemas son principal

mente lograr y mantener tal temperatura para que la fusión se lleve a cabo y encontrar el receptáculo adecuado para controlarla.

Actualmente la investigación tiende a enfocarse hacia fuentes de energía no contaminantes, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Un campo de acción en desarrollo, lo constituye la captación de energía a través de un proceso magnetohidrodinámico para producir electricidad. Esta técnica de conversión consiste en pasar un plasma a través de un campo magnético generándose una corriente eléctrica con una gran eficiencia.

Se ha intentado aprovechar el calor existente debajo de la corteza terrestre, o sea, la energía geotérmica, utilizando vapor sobrecalentado de depósitos naturales o vapor producido por la inyección de agua a través de perforaciones profundas, para generar electricidad.

Otras fuentes no contaminantes de energía, factibles de investigación, son la energía eólica, la energía solar y la energía de las mareas. Aunque estas formas de energía han sido utilizadas por el hombre, no lo ha sido a gran escala ni eficientemente, pudiendo satisfacer en el futuro una fracción importante de las necesidades energéticas de la sociedad moderna, si se aprovecharan adecuadamente, la tecnología puede no ser muy sofisticada, lo que hace su utilización atrayente por su bajo costo.

Se puede considerar al Sol como la planta de fusión nuclear modelo, ya que no contamina, es fuente ilimitada de energía (segura y continua) sin la cual no existiría la vida en la Tierra.

Para fines prácticos se puede considerar al Sol como un cuerpo negro que emite radiación a 6000°K. La luz que nos llega del Sol recorre 150 millones de kilómetros antes de llegar a la Tierra y su espectro de emisión tiene un rango de longitud de onda que va de aproximadamente 2500 a 30000 Å.

La radiación solar proviene de la fusión de 657 millones de toneladas de masa de hidrógeno a 653 millones de toneladas de masa de helio que se lleva a cabo a una temperatura de 8 a 40 millones °K. La diferencia en masas es descargada al espacio en forma de energía, recibiendo la Tierra solo dos billonésimas partes de ella, o sea, cada 15 minutos la radiación emitida alcanzaría para suministrar los requerimientos energéticos del planeta durante un año. Esta energía equivale a 173 trillones de kW. La radiación solar incidente sobre la Tierra es constante y tiene un valor medido fuera de la atmósfera de $1.94 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ (constante solar terrestre).

Obviamente no toda la energía que recibe la Tierra es aprovechable, ya que aproximadamente el 30% es reflejada como radiación de onda corta, el 47% es absorbida por la atmósfera, la tierra y los océanos, el 23% se utiliza en procesos de evaporación, convección y ciclos hidrológicos.

Otro factor que hay que tomar en cuenta es que no podemos transformar la energía solar en otro tipo de energía utilizable con una eficiencia del 100%; pero aún así la energía aprovechable basta y sobra para nuestras necesidades actuales.

La razón por la cual la energía solar no ha sido utilizada con mayor participación en nuestra sociedad, es que su captación en un lugar da

do sobre la superficie de la Tierra no es continua, requiriéndose sistemas - de almacenamiento para asegurar su disponibilidad en cualquier momento. La energía radiante que recibimos es abundante, sin embargo es de baja temperatura o poco concentrada.

Se puede decir que en general hay dos formas de captar la energía solar como tal, que son: la forma directa y la forma concentrada.

En la captación directa se utiliza la energía solar incidente sobre una superficie para producir otro tipo de energía utilizable. Dicho -- aprovechamiento hace uso de la energía solar sin que esta haya sido transformada a otros tipos de energía como serían: energía química (alimentos - y carbón), energía cinética (mareas y viento) y sin que sea concentrada la energía incidente sobre un área en un área menor.

Las aplicaciones que actualmente se le dan a este tipo de captación son:

- Desalinización y Destilación de Agua.
- Calentar y Acondicionar Casas y Edificios.
- Calentamiento de Agua para Servicio Doméstico.
- Generación de Electricidad por Medio de Celdas Fotoeléctricas.
- Evaporación y Procesos de Secado.

Este tipo de captación limita la máxima temperatura alcanzable a aproximadamente unos 250 grados Centígrados, que es la temperatura que alcanza un cuerpo negro casi perfectamente aislado expuesto al sol.

Cuando se usa la energía solar en forma concentrada se hace con el objeto de alcanzar mayores temperaturas. La luz solar se puede concentrar con diversos equipos y la aplicación principal que se le da es para operar hornos, calderas y para transformarla en electricidad más eficientemente. La temperatura más alta alcanzada por este método de captación es de aproximadamente 3200°C en el horno solar de Mont Louis en los Pirineos franceses.

El viento es una manifestación secundaria de la energía solar, la atmósfera actúa como gigantesca máquina térmica al ser calentado y enfriado alternativamente el aire por el impacto directo de los rayos solares.

La insolación, más potente en el ecuador que en las regiones polares, hace que el aire tropical se caliente y se eleve mientras que el aire polar, más frío, se desplaza para sustituirlo.

Otro factor que da origen a la formación de viento es la redistribución atmosférica de la energía solar absorbida de diferente manera por mar y tierra.

El vapor de agua en el aire almacena la energía solar en forma de energía latente. Cuando la humedad del aire se evapora y condensa alternativamente, esta energía es transferida a la atmósfera y se pone de manifiesto en forma de viento.

La rotación de la Tierra y las condiciones atmosféricas locales perturbando constantemente el movimiento de las corrientes atmosféricas, que-

pueden adquirir una gama de velocidades, que va desde una ligera brisa con promedio de 7 km/hr (aprox. 2 m/seg) hasta el huracán de más de 104 km/hr - (aprox. 29 m/seg).

Lo anterior es un factor que limita en un alto grado su uso y por ende su eficiencia de transformación en trabajo utilizable.

La energía eólica, debido a lo anterior, no es una forma de energía ilimitada, ya que no es constante; pero sería muy loable el que se utilizara convenientemente, siempre que sea posible.

Fundamentalmente se ha hecho uso de la energía dinámica del viento para transformarla a otras formas de energía, como lo son la energía mecánica y la energía eléctrica.

La energía dinámica del viento se ha usado directamente desde tiempo inmemorial para mover los barcos de vela, transformada en energía mecánica, para extraer agua del subsuelo así como para bombearla de un lugar a otro y para moler granos. Se están realizando trabajos para que los molinos de viento se conviertan en una importante fuente de energía eléctrica.

El presente trabajo realiza un estudio de la posible aplicación de la energía solar en sus diferentes manifestaciones para lograr la autosuficiencia energética de una casa.

Debido a la gran variedad de condiciones climatológicas del país y las diferentes características que presenta la radiación solar de un lugar

a otro, un estudio de la aplicación y aprovechamiento de este tipo de energía no puede hacerse general, sino limitado a una zona que presente las mismas condiciones y características antes mencionadas.

Debido a que el trabajo presentado es fundamentalmente teórico, - se consideró únicamente la zona del Valle de México, dada la disponibilidad de datos meteorológicos y de radiación solar.

Por razones económicas se descartó el uso de concentradores de -- energía solar, ya que el objetivo del trabajo es diseñar un equipo de bajo-costo factible de usarse a gran escala.

Se tomaron como susceptibles de aplicación para la autosuficiencia energética de una casa la transformación de energía solar en energía eléc-- trica, la captación directa de la energía térmica solar y el aprovechamiento del viento.

Como se mencionó al principio de esta introducción existen varios factores que justifican el estudio de fuentes no convencionales de energía, principalmente la del Sol y sus manifestaciones secundarias.

Por otro lado, se puede decir que México se encuentra entre los - países que mayor ventaja pueden sacar de estas formas de energía, tanto por su localización como por su desarrollo técnico.

El mayor potencial de aprovechamiento de energía solar se encuentra comprendido entre las latitudes 40°Norte y 40° Sur, zona en la cual pa-

radojicamente se localizan la mayoría de los países subdesarrollados. Dichos países no poseen en la actualidad los medios ni la tecnología para desarrollar nuevas fuentes de energía altamente sofisticadas que les aseguren el suministro de energía en el futuro, cuando la producción del petróleo de caiga o sea utilizado para otros fines con mayor beneficio para la humanidad que el actual como combustible.

R E S U M E N

El presente trabajo hace un estudio de algunos equipos elementales que existen en la actualidad para aprovechar la Energía Solar y la Energía Eólica y transformarlas a otras formas energéticas que puedan ser utilizadas para cubrir los requerimientos en una casa convencional. El objetivo del estudio es establecer los elementos y un posible sistema integrado que puedan ser utilizados en México para lograr la autosuficiencia energética en una casa.

En el capítulo 1 se estudia la captación y transformación de la Energía Solar Radiante por medio de celdas fotoeléctricas, que comprenden tanto celdas fotovoltaicas como celdas termoeléctricas para producir electricidad, y por medio de colectores planos para calentar agua. Se diseña y analiza matemáticamente el funcionamiento de un sistema calefactor solar de agua para servicio en una casa, considerando las condiciones climatológicas y de radiación solar existentes en el Valle de México, con el objetivo de establecer un sistema económicamente viable, aplicable a gran escala.

En el capítulo 2 se analiza el uso que se le ha dado al viento a través de la Historia hasta nuestros días para aprovechar su energía. Se hace un breve análisis de los principios y bases teóricas que rigen el funcionamiento del equipo usado para captar y transformar la Energía Eólica, así como de la actual aplicación y existencia de equipo movido por viento con posibilidad de usarse para lograr la autosuficiencia energética en una casa.

El capítulo de conclusiones menciona ventajas y desventajas de --

lós equipos estudiados así como la posibilidad existente actual de aplicarse en México con el fin de suplir energía. Se presentan algunas recomendaciones que debieran observarse con el fin de hacer de la Energía Solar y sus manifestaciones secundarias una fuente de energía que complemente el panorama actual energético del país.

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

El factor económico es actualmente el principal problema que limita el aprovechamiento de la Energía Solar y Energía Eólica, debido a que el desarrollo de elementos y equipos modernos que captan y transforman eficientemente este tipo de energías no empezó hace mucho tiempo, se fabrican casi exclusivamente prototipos para experimentación con un elevado costo, aunque la captación de la Energía Térmica Solar ya se ha aplicado en algunos países para calentar agua y acondicionar habitaciones.

Dado el factor económico y la escasa investigación que se hace en México en este campo para desarrollar elementos específicos para las condiciones en el país, se deben excluir actualmente algunos elementos y equipos de una posible aplicación. Tanto sistemas que pretendan suministrar energía a altas temperaturas, y que por lo tanto requieren de concentradores de la radiación solar, como celdas fotoeléctricas para producir electricidad, no son considerables debido a su alto costo en relación con la energía suministrada.

Los concentradores de la Energía Solar son caros debido al alto costo del material y de la fabricación, además de requerir de un mecanismo de orientación continua hacia el Sol.

Las celdas fotoeléctricas deben su condición antieconómica a las bajas eficiencias de transformación alcanzadas hasta ahora y a la escasa tecnología existente que permita la creación de materiales que no se degraden con la exposición a la radiación solar y a la humedad y con resisten-

cias mecánicas suficientes que resistan los grandes cambios de temperatura a que se ven expuestos.

Las celdas fotoeléctricas con mayor perspectivas al futuro son las celdas de Silicio, debido a su bajo costo como materia prima y a nuevas técnicas que bajan los costos de producción de las celdas en sí. Sin embargo, se prevé que no será sino dentro de unos 15 ó 20 años que este tipo de elementos suministrarán energía a un costo competitivo con otras fuentes energéticas.

Los requerimientos energéticos en una casa con consumo de energía moderado pueden ser cubiertos en su totalidad por un sistema integrado de colectores solares planos y un generador eléctrico de viento. El sistema de colectores planos puede suministrar energía calorífica a bajas temperaturas para calentar el agua de servicio y para acondicionar la casa, operando la calefacción y el aire acondicionado. El generador eléctrico de viento proporcionaría electricidad para el alumbrado y para suministrar energía calorífica a altas temperaturas.

Un sistema integrado totalmente, independiente de otras fuentes de energía, requiere de una inversión inicial alta, como se deriva del estudio, de aproximadamente 55,000 pesos, debido a los sistemas de acumulación de energía requeridos para lograr un suministro continuo a pesar de lo variable de las fuentes energéticas que se aprovechan. Por otro lado, un sistema totalmente independiente con ese costo requeriría de condiciones de radiación solar y de viento óptimas.

Se puede considerar dicho sistema como sistema complementario en

Los sistemas energéticos convencionales, lo que resultaría una alternativa más práctica. El sistema complementario operaría cuando las condiciones de radiación y/o de viento fueran favorables, permitiendo al usuario hacer ahorros en energéticos. Un sistema así puede ser diseñado sin el equipo de acumulación de energía eléctrica, lo que bajaría el costo del sistema a aproximadamente 48,000 pesos. La amortización del equipo se logra a través de los ahorros en gastos en energéticos convencionales, ya -- que prácticamente no tiene gastos de operación. El tiempo de amortización depende de las condiciones climatológicas que se tengan en el lugar donde se opera, ya que principalmente la potencia suministrada por el generador eléctrico de viento depende altamente de los promedios de velocidad del viento. La vida media útil del equipo es de 35 a 40 años, por lo que una vez amortizada la inversión inicial, los ahorros en combustibles y energía eléctrica resultan en una utilidad neta para el usuario.

Las condiciones climatológicas del Valle de México permiten sacar considerable ventaja de la radiación solar aproximadamente durante -- ocho meses al año para proporcionar energía calorífica a baja temperatura. El costo del equipo necesario para instalar un sistema calefactor solar -- es actualmente de 23,500 pesos y se estima un periodo de amortización, a través de ahorros en hidrocarburos combustibles al precio actual, de aproximadamente diez años.

Las condiciones de viento en esta zona no permiten el uso de generadores de viento, ya que se tienen promedios de velocidades del viento de 1.7 a 2.2 m/s, que no están dentro del rango para la operación de dichos equipos.

Esto se debe precisamente a la situación geográfica del valle, - que se encuentra rodeado por cadenas montañosas que no permiten el acceso del viento a la parte baja.

Es en la parte alta de estas cadenas montañosas donde se cuenta con un gran potencial de Energía Eólica aprovechable, que podría ser captado por medio de un sistema integrado de grandes plantas eoloelectricas, que podrían coadyuvar con una fracción considerable en el suministro energético del Valle de México.

La ventaja del uso en México de estas fuentes de energía renovable no radica exclusivamente en la utilidad económica que puede percibir el usuario, pues tiene repercusión en la economía y política nacionales.

Actualmente se tienen las siguientes fuentes energéticas en - - nuestro país, que cubren el requerimiento anual de energía, al cual se le calcula un valor aproximado en metros cúbicos de petróleo crudo equivalente (MCPCE) de 43.745 millones; en primer lugar están los hidrocarburos - con una contribución del 90.6% del consumo nacional, le sigue el carbón - mineral con un 5.3% y por último, contribuyendo con el 4.1% se tiene a la energía hidráulica. Aproximadamente el 7.2% de estas fuentes se transforma en energía eléctrica y el restante 92.8% se consume como combustible - directamente.

Investigaciones realizadas nos suministran los siguientes datos: se tienen en reserva 3116 millones de barriles de petróleo crudo, que amparan el consumo actual en un período de 28 años, lo referente a gas natural se cuenta con una reserva de 11.8 billones de pies cúbicos que ampa--

ran el consumo actual durante 24 años, las reservas de carbón mineral que amparan el consumo actual por 1450 años están dadas por la existencia de 4215 millones de toneladas.

Lo anterior nos muestra que el desarrollo económico de México se ha fincado en el consumo masivo del petróleo y gas natural, llegándose a una situación de dependencia exclusiva de casi una sola fuente de energía no renovable con una reserva limitada a no más de 40 años, ante esta situación es necesario y requisito indispensable que el país diseñe una política de energéticos que tienda a racionalizar y elevar la eficiencia en el consumo de las reservas de los recursos no renovables y de diversificación de fuentes energéticas. Es necesario evitar las economías de desperdicio donde se hace uso excesivo, masivo y poco racional, de los energéticos convencionales; la población debe adquirir, a través de campañas de educación auspiciadas por las instituciones gubernamentales, conciencia de la situación y aceptar el uso de nuevas fuentes energéticas.

No es justificable ni conveniente que se mantengan precios por debajo de los costos de producción en las empresas paraestatales oferentes de energéticos, por el establecimiento de políticas de subsidio, ya que frenan, por un lado, la iniciativa del sector privado para desarrollar tecnologías que contribuyan con fuentes de energía, y por otro lado, se crea una situación en la cual no es posible alcanzar que el costo de nuevos energéticos sea competitivo.

Dentro de los próximos 15 o 20 años no es factible obtener energía abundante y barata a partir del átomo, debido al alto costo de generación actual y por el difícil y crítico problema de eliminación de subpro-

ductos.

El carbón mineral no ha sido objeto de la debida atención en su explotación, su actual uso, principalmente en la industria siderúrgica y como combustible, debería ampliarse hacia el desarrollo de la Carboquímica.

La Energía Geotérmica no contribuirá en forma sustancial al problema energético en México en su posible solución; pero puede contribuir a la diversificación de la oferta energética nacional.

Otras fuentes de energía no convencionales como el aprovechamiento del hidrógeno, la Energía Solar, la Energía Eólica, pueden contribuir con una fracción considerable para cubrir las necesidades energéticas nacionales, para lo cual se hacen las siguientes recomendaciones.

Es indispensable que se elabore un plan integral a corto plazo que norme el potencial existente de Energía Solar y Energía Eólica por medio de:

Desarrollo de investigación tecnológica, elaboración de tablas de radiación horaria, realizar un inventario de los lugares con un alto potencial de posible aprovechamiento de la energía de los vientos que contemple información lo más completa que sea posible y crear plantas centralizadas eolieléctricas y termosolares de captación a gran escala de estas fuentes de energía para suministro regional o nacional.

CAPITULO I
ENERGIA SOLAR

1.1. Transformación de la Energía Solar
en Energía Eléctrica.

1.1.1.- GENERACION DE ELECTRICIDAD A PARTIR DEL EFECTO FOTOELECTRICO

1.1.1.1.- CELDAS FOTCELECTRICAS.

La producción o generación de electricidad por medio de celdas fo toeléctricas es un medio de gran potencialidad en un futuro próximo ya que son de gran confiabilidad y tienen un costo de mantenimiento muy bajo, casi nulo a comparación de sistemas eléctricos utilizados en la actualidad.

Los principales obstáculos para su utilización en forma más general son dos principalmente:

- a) Elevado costo 312.50 pesos/watt.
- b) Almacenamiento de grandes cantidades de energía eléctrica para usos posteriores.

El costo de las celdas solares se espera que disminuya considerablemente al encontrarse y desarrollarse alguna forma en que se produzcan en grandes cantidades; la forma más prometedora es la de producir hojas delgadas de cristal de Silicio; actualmente los cristales de Silicio y algunos - otros semiconductores se hacen crecer a determinado tamaño y posteriormente se les corta a los tamaños adecuados. Dado que el Silicio es bastante barato, ya que es el segundo elemento de mayor abundancia en la corteza terrestre costando aproximadamente 7,500.00 pesos/Ton., su utilización en el momen

to en que llegue a perfeccionarse la producción en masa de celdas solares a partir de él, hará que el costo baje a 12.50 pesos/watt, lo cual lo hará ya competitivo para la generación de electricidad en gran escala.

Existen actualmente en los EE.UU. cuatro compañías que fabrican celdas solares: Heliotech, Centralab, Solar Power Corporation y la Sharp. Las características principales (amperaje y potencia) de estas celdas son las dadas en la Fig. 1.1.1.1.a

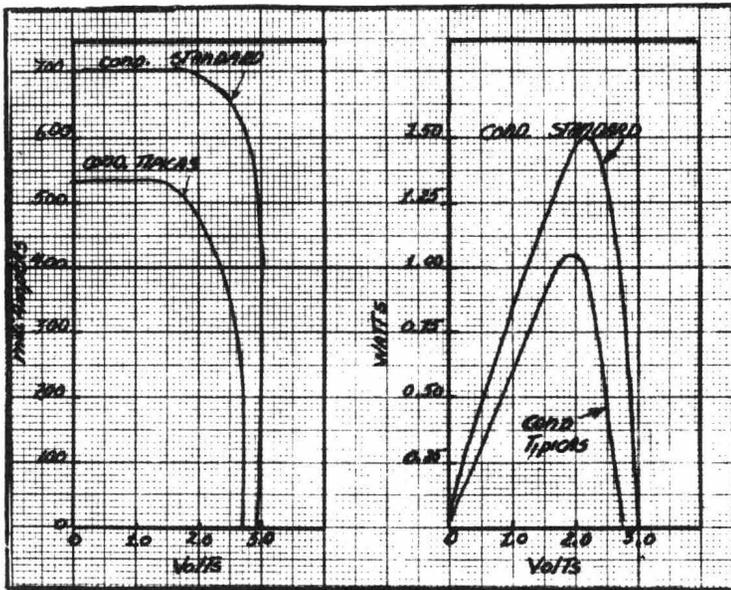


Fig. 1.1.1.1.a.

Las condiciones a las cuales se hace alusión tienen las siguientes características:

- I- Cond. Standard: 0°C y 1000 W/m² de insolación.
- II- Cond. Típicas: 25°C y 800 W/m² de insolación.

Estudios recientes han indicado que aún el costo de 12.50 pesos/-

watt debe bajarse a 2.50 pesos/watt para que su aplicación sea competitiva y factible con otros medios existentes de producción de electricidad. Una forma de reducir el costo de generación de electricidad por medio de celdas solares es haciendo uso de concentradores, de tal manera que afoquen la luz a una celda de manera más intensa. Un tipo de concentrador muy utilizado es el de cono, ver Fig. 1.1.1.1.b.

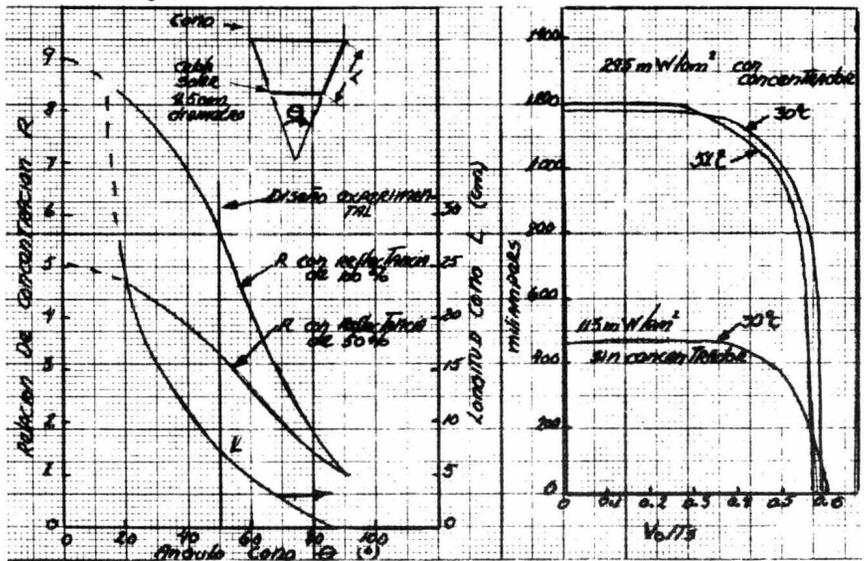


Fig. 1.1.1.1.b.

Este, sin enfriadores de ningún tipo, mejora en un factor hasta de 5 la eficiencia de la celda, sin que ésta se dañe, con cambiadores de calor la eficiencia llega a mejorar por un factor de 100.

La forma más práctica de utilizar la energía solar para proveer a una casa de todos sus requerimientos energéticos requiere del desarrollo de celdas solares baratas, o de medios económicos viables tal que transformen el calor solar a altas temperaturas a energía eléctrica; para este efecto, las celdas fotovoltaicas o fotoeléctricas pueden combinarse con colectores planos, ver Fig. 1.1.1.1.c.

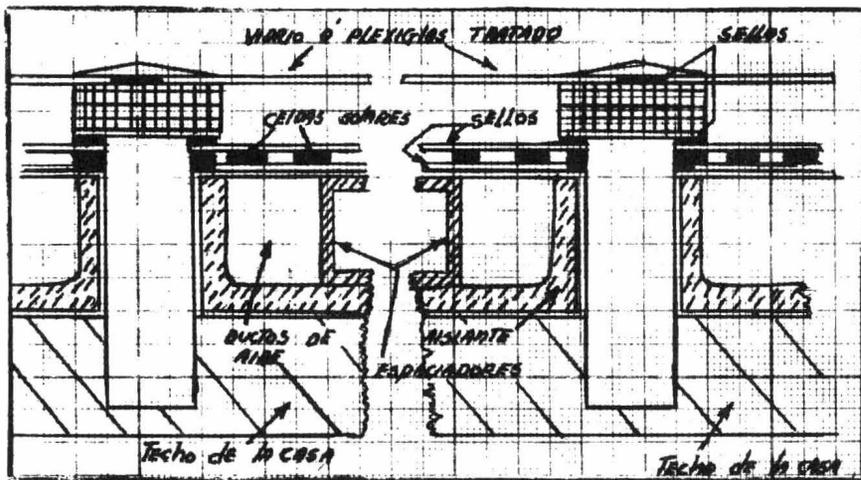


Fig. 1.1.1.1.c.

de tal manera que la energía que no se aprovecha o que no se convierte en eléctrica, puede utilizarse y almacenarse en forma de calor. Un arreglo como el de la Fig. 1.1.1.1.d.

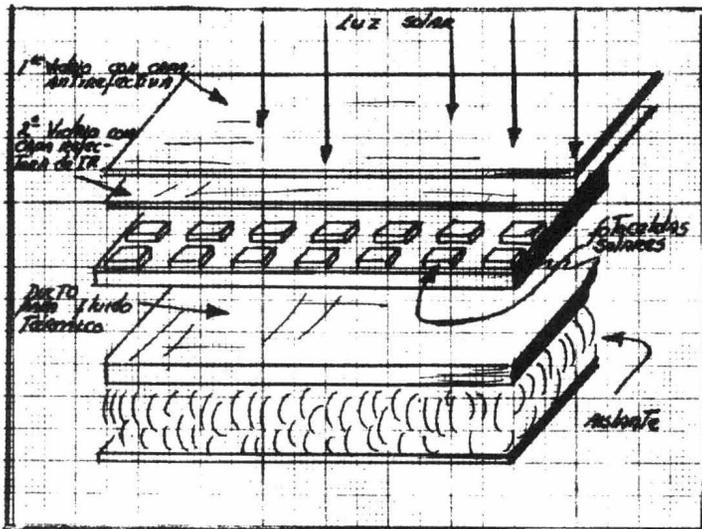


Fig. 1.1.1.1.d.

permite la utilización o aprovechamiento de hasta un 60% de la energía inci

dente, estos colectores se colocan preferentemente en las paredes de la casa y/o en las azoteas.

Dado que las celdas a base de Silicio son las más utilizadas, serán las que a continuación se describan.

El Silicio en estado puro como cristal, posee una valencia de cuatro, donde los átomos están dispuestos en una forma regular y uniforme, formando redes cristalinas. Si algún elemento del grupo V, como el Arsénico, se introduce como impureza cuando el Silicio se encuentra fundido y posteriormente se le deja enfriar lentamente, de tal forma que forme un cristal, éste en su arreglo íntimo tendrá en ciertos lugares de su red átomos de Arsénico, en lugar de Silicio, cuatro de los cinco electrones de la última capa del Arsénico servirán para formar enlaces con los átomos de Silicio circunvecinos, mientras que el quinto quedará libre para fluir y por tanto conducir corriente eléctrica. Asimismo, si introducimos un elemento del grupo III como el Boro, en un cristal de Silicio, análogamente al caso anterior, este tiende a tomar un electrón adicional dentro de su átomo, lo cual deja al átomo de Silicio del cual lo tomó con una carga negativa menos, creándose así una carga positiva o "poro", el cual también es libre de desplazarse.

Aunque el Silicio puro es un buen aislante eléctrico, se convierte en un conductor regular de corriente cuando se le hacen algunas de las alteraciones anteriores, teniéndose así lo que se conoce como un semiconductor.

En una celda fotovoltaica una capa negativa N, con cargas positivas

fijas y negativas libres para fluir, se pone en contacto con una capa P positiva, donde los electrones están fijos, pero los "poros" positivos están libres de moverse. Sucede que en la superficie de contacto entre ambas capas, los electrones libres se difunden y al encontrar a las cargas positivas también difundidas en dicha superficie, se neutralizan unos a otros, dejando - tras de sí iones positivos de Arsénico en la capa N, y iones negativos de Boro del lado P, donde originalmente las capas eran neutras, ahora existe - una carga positiva del lado N de la barrera, que impide la mayor difusión - de los agujeros positivos a ella y de igual manera una carga negativa de la - do P, que impide la difusión de electrones.

Cuando una luz de suficiente energía, en el caso del Silicio, es absorbida, el rango (visible - infrarrojo, onda corta), cada unidad de luz, es decir, cada fotón produce un electrón y una "carga positiva". En el caso de un cristal de Silicio puro, estos se vuelven a recombinar instantáneamente, siendo el resultado final que la luz sólo se convierte a calor. Sin embargo, debido a la barrera que se forma en la junta P-N, los electrones - que se producen en la capa N se dirigen al otro electrodo; al irse acumulando en electrodos separados, se va creando una potencial y la corriente - fluye a través del cable que une a los dos electrodos.

Existe la tendencia en ambos, electrones y "cargas positivas", de combinarse en el trayecto antes de llegar a su electrodo correspondiente, - lo cual hace disminuir la corriente aprovechable, este efecto se aumenta - grandemente si en la red del Silicio que forma las placas existen impurezas de otros elementos diferentes a los puestos intencionalmente, este hecho hace que inicialmente se parta con elementos muy puros (impureza de 1 ppm). - Otro factor de importancia son las irregularidades que presenta el cristal-

de Silicio en su superficie, las cuales tienden a catalizar esta combinación antes de los electrodos, por lo cual se ha tenido que usar monocristales de gran tamaño de Silicio y no pequeños cristales conectados entre sí.

La energía que se requiere para que los conductores de cargas eléctricas circulen dentro de la red cristalina, depende principalmente del enlace químico. En el caso del Silicio, como se mencionó anteriormente, todo el espectro de la luz visible y hasta longitudes de onda de $11,500 \text{ \AA}$ en el Infrarrojo bastan para que el fenómeno se realice; longitudes de onda menores no llegan a excitar a los electrones, y fotones con menor longitud de onda, aunque sí lo logren, lo hacen con menor eficiencia y se pierde energía.

Se ha visto que la mayor conversión ocurre a una longitud de 7000 \AA , que es aproximadamente igual a la de la máxima intensidad solar.

EFFECTO FOTOELECTRICO, CONSIDERACIONES GENERALES

El efecto fotoeléctrico consiste en la generación de una fuerza electromotriz a partir de la absorción de energía radiante. Este proceso ocurre por igual en gases, líquidos y sólidos. Se ha observado que si se permanece dentro del rango de $100-500 \text{ }^\circ\text{K}$, sólo el estado sólido reporta eficiencias aceptables, por lo cual es el más utilizado.

El efecto fotoeléctrico es un proceso de dos etapas o pasos. En el primer paso el fotón absorbido genera una carga negativa y otra positiva adicionales a las existentes debidas al equilibrio térmico. En el segundo,

las cargas se separan debido a la existencia de un campo eléctrico producido por lo heterogéneo del sistema. En la mayoría de las celdas fotoeléctricas más eficientes (Silicio, Cu-Cd-Si, GaAs, InP, Se, etc.) la naturaleza heterogénea se debe a una de dos causas:

1) Barrera metal-semiconductor o

2) Junta de las dos regiones del semiconductor (junta P-N). Esta junta P-N puede ser de dos clases: Homogénea, con materiales como el Silicio, GaAs, InP y W en ambos lados. Otro tipo es la Heterogénea, que es la unión de dos semiconductores diferentes. Las más utilizadas son pSe-nCdSe, pCu_2S_x-nCdS y $nCdTe-pCu_2Te_x$.

La absorción de fotones es un fenómeno que depende de las propiedades ópticas de los materiales en cuestión, de ahí que se estudie e investigue a nuevos materiales con determinadas propiedades ópticas.

Se ha visto que la eficiencia con que son separadas y recolectadas las cargas producidas al absorberse un fotón depende de varios factores:

- a) Geometría de la celda.
- b) Conductividad del semiconductor.
- c) Velocidad de recombinación superficial.
- d) Longitud de la difusión de las cargas libres.

Acerca de estos factores la investigación actualmente se canaliza a estudiar los efectos geométricos, las consecuencias de distintas concentraciones de impurezas y cómo disminuir la velocidad de recombinación super

ficial principalmente.

JUNTAS HOMOGÉNEAS

La celda fotoeléctrica monocristalina de Silicio es la más perfeccionada dentro de las celdas de juntas homogéneas. Tiene una eficiencia teórica máxima de un 20%; las comercialmente vendidas actualmente tienen -- eficiencias de 10% máximo.

Se han realizado estudios sobre estas celdas comerciales de Silicio y se sugieren varias mejoras con el fin de aumentar su eficiencia hasta casi la máxima teórica.

Las principales son:

a) Mejorar la calidad del cristal de Silicio utilizado.

b) Reducir la velocidad de recombinación superficial de 10^5 cm/seg. a un valor menor de 10^2 cm/seg, esto a su vez propiciaría que las celdas aumentaran su rango de operación hasta el azul-violeta del espectro, lo cual a su vez aumentaría de gran manera la corriente aprovechable.

El aumento de la eficiencia de las celdas solares es básico para el desarrollo de satélites orbitales y en menor grado para aplicaciones terrestres. La utilización de celdas solares de alta eficiencia reduciría el número de ellas necesarias para un proyecto dado, lo cual significa menores costos de instalación y montaje, menores costos de intercomunicación eléctrica entre ellas mismas y hasta posiblemente una baja en los costos de man

tenimiento. Sin embargo, la mayor eficiencia de las celdas solares por sí sola, no garantiza la solución a los problemas económicos para su utilización terrestre.

El costo actual de celdas de Silicio de juntas homogéneas es varios órdenes de magnitud muy grande. Un estudio realizado por Loferski al método de refinamiento por zonas que es el que da la mayor producción de cristales de Silicio, indica que es tan ineficiente que simplemente el costo de la energía térmica utilizada en la manufactura se recobraría después de 40 años de operación de la celda.

Hoy en día sabemos por experiencia que por medio de técnicas de producción en masa en grandes industrias, los costos de producción para grandes volúmenes disminuye considerablemente, se ha estimado que para celdas fotoeléctricas de Silicio, esta disminución debe ser del orden de 100. La investigación actual se concentra principalmente en dos áreas que serían: la preparación de cristales muy puros de Silicio por técnicas diferentes a las clásicas, principalmente a la de refinación por zonas y a la utilización de cristales de Silicio con menor pureza como en el caso de las Industrias Solarex.

Celdas solares del tipo de junta homogénea, hechas con materiales diferentes al Silicio, generalmente operan con eficiencias superiores, pero por el momento existen serios problemas por lo limitado de los materiales utilizados o por los elevados costos de producción, por lo cual se puede decir que las celdas de Silicio son las únicas con posibilidades de algún día ser utilizadas en grandes cantidades.

JUNTAS METAL-SEMICONDUCTOR

Este tipo de celdas forman otro gran grupo, en el cual se aprovecha la naturaleza heterogénea entre un metal y un semiconductor para la -- creación de un potencial eléctrico. Dado que se pueden fabricar utilizando la tecnología principalmente del vacío que está muy avanzada, promete por -- tal razón unos costos de producción notablemente menores que los de las cel-- das de Silicio monocristalinas.

JUNTAS HETEROGENEAS MONOCRISTALINAS

Las celdas fotovoltaicas del tipo heterogénea se fabrican al ha-- cer crecer un semiconductor sobre de otro llamado base. En este tipo de -- celda, el arreglo cristalino de ambas partes debe ser igual y además las -- constantes de dichos arreglos deben ser similares, de preferencia iguales.

Se han fabricado unas cuantas variedades de este tipo de celdas,- y se ha llegado a la conclusión de que aquellas hechas a partir de una com-- binación de Silicio y elementos del grupo III y IV dan eficiencias muy supe-- riores al 20%, por ejemplo la celda pSi-nGaAs tiene una eficiencia del 30%.

Este tipo de celda tiene la gran ventaja de que su parte frontal-- puede ser transparente a la radiación, lo cual hace posible que la junta en-- tre las dos partes de la celda pueda ser separada una pequeña fracción, lo cual reduce considerablemente la recombinación superficial.

Estas celdas requieren que los cristales sean de una alta pureza-

para la base y que el crecimiento epitaxial sea relativamente lento. Estas dos condiciones hacen que sea poco factible producirlas a un costo menor -- que las celdas homogéneas de Silicio, sobre todo si se incluyen materiales tan caros como el Galio.

JUNTAS HETEROGENEAS POLICRISTALINAS

Las celdas fotovoltaicas heterogéneas, pueden hacerse a partir de capas muy delgadas de materiales policristalinos, con las obvias ventajas - de disminución de costos de producción. La celda de CdS es de este tipo y su principal ventaja es su facilidad de fabricación.

La celda de Cu-CdS consiste de una delgada capa policristalina de CdS de aproximadamente $10\ \mu\text{m}$, sobre la cual se hace crecer otra capa de -- Cu_2S de aproximadamente $0.1\ \mu\text{m}$. Existe todavía muy poca información acerca de las eficiencias de estas celdas, pero hasta la fecha (1973), las mayores eficiencias reportadas eran de 4 a 5% y por su misma naturaleza, es poco probable que ésta aumente. Otro de los inconvenientes de estas celdas, - es su confiabilidad, se ha observado que la humedad las degrada hasta en un 50% y la luz junto con el voltaje, tienden a disminuir su operación.

Como conclusión, basada en un estudio de la compañía Du Pont, se puede decir que estas celdas no son competitivas con los métodos actuales - convencionales de generar electricidad. Este estudio daba un costo de - - $62.50\ \text{pesos}/\text{m}^2$ a las celdas.

1.1.2.- Generación de Electricidad a Partir del Efecto Termoeléctrico.

A partir de la diferencia de temperatura aplicadas a un termopar, es posible desarrollar un potencial eléctrico que nos genere una corriente eléctrica para usos diversos; la ventaja de usar este efecto, es que no intervienen piezas mecánicas que bajen la eficiencia del proceso.

Este efecto fue descubierto en 1821 por Seebeck.

Los termopares más usados originalmente fueron los de Constantano (Cu/Cu-Ni) y el de Alumel-Cromel (Cu/Cr-Al), dando $42 \frac{\text{microvolts}}{^{\circ}\text{C}}$ y $65 \frac{\text{microvolts}}{^{\circ}\text{C}}$ respectivamente.

Para poder aprovechar la energía solar en este efecto, los termopares deben reunir tres características principales:

- a) Alta relación de voltaje producido /^o Temperatura.
- b) Alta conductividad eléctrica, para evitar pérdida por calor
- c) Baja conductividad Térmica, para evitar la transferencia de calor de la junta caliente a la junta fría.

En general los metales no cumplen con las condiciones (b) y (c) lo suficiente como para hacer factible su uso en aplicaciones solares, por lo cual en la actualidad se utilizan los semiconductores, que incluyen elementos de los grupos intermedios de la tabla periódica, siendo los más usados el Silicio, óxidos y sulfuros.

1.1.2.1.- Efecto y Elementos Termoelectricos.

En un metal los electrones están libres y pueden desplazarse hacia un electrodo positivo (cátodo) puesto en contacto con el metal, por tanto -- formándose una corriente eléctrica. Asimismo, cuando un pedazo de metal se calienta en uno de sus extremos habrá un flujo de electrones al extremo -- opuesto frío, donde la rapidez del flujo dependerá de la naturaleza del metal. Si aprovechamos los dos fenómenos anteriores por medio de dos metales diferentes que componen un alambre en forma alternada de la manera : $A_1-B_1-A_2-B_2-A_3-B_3$ -.etc. y si calentamos la unión A_1-B_1 mientras que al mismo tiempo enfriamos la B_1-A_2 , se creará un potencial y se podrá extraer la corriente -- que pasa de A_1 hacia A_2 para operar un motor o algún instrumento eléctrico.- El mismo procedimiento puede hacerse un número indefinido de veces, colocando los termopares en serie y siendo el voltaje en las terminales la suma de los voltajes individuales de cada termopar; hay que notar también, que las resistencias son aditivas y que por tanto hay un número óptimo para este tipo de arreglos.

En general, se ha visto que en termopares de elementos metálicos - desiguales los voltajes van de 20 a 60 microvolts/°C y en termopares de semiconductores desiguales, se llegan a valores de 1000 microvolt./°C.

Los semiconductores son cristales puros, a los cuales se les han agregado ciertos tipos de impurezas previamente determinadas. Los cristales puros no conducen la corriente eléctrica, pero cuando se les incorporan pequeñas cantidades de un elemento de mayor valencia a sus arreglos cristalinos, los electrones adicionales tienen la libertad de desplazarse haciendo -

al semiconductor un regular conductor de la electricidad. Existen dos tipos principales de semiconductores según el tipo de impureza que se les haya incorporado a los cristales:

- I N-Semiconductor, es aquel que posee exceso de electrones.
- II P-Semiconductor, es aquel con "cargas positivas" que pueden desplazarse.

Estos dos tipos de semiconductores son dispuestos de la siguiente forma, Fig. 1.1.2.1.a. En forma análoga a los termopares descritos inicialmente.

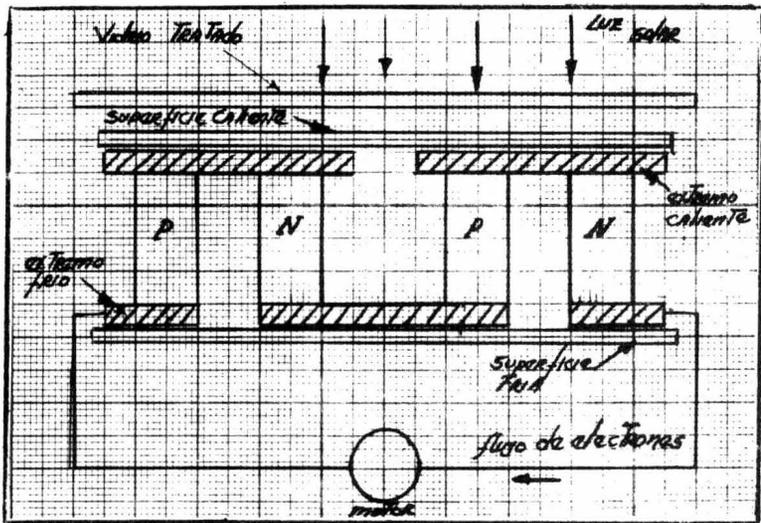


Fig. 1.1.2.1.a.

Existen diferencias en las velocidades de migración o flujo entre los electrones y las "cargas positivas" para un mismo gradiente de temperatura

ra, lo cual hace que se formen potenciales entre ellos.

La eficiencia de estos generadores termoeléctricos se define como la relación de energía disponible en el circuito eléctrico externo entre la energía total que se recibe en la junta o superficie caliente. La máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse, está limitada por la relación del Ciclo de Carnot, según la cual la eficiencia se calcula según $(T_2 - T_1)/T_2$, donde T_2 es la temperatura absoluta mayor y T_1 la menor. Existen además otros factores que disminuyen la eficiencia bastante de aquella que se calcula según el Ciclo de Carnot, y que son principalmente:

- a) Pérdidas de calor a lo largo del termopar, entre la junta caliente y la fría.
- b) Pérdidas por la producción de calor al pasar la corriente por el termopar.

Actualmente se realizan investigaciones con el objeto de encontrar materiales adecuados para los termopares N y P que minimicen dichas pérdidas. Elementos con 4, 5 y 6 electrones en su capa externa, son los más utilizados, también semiconductores con impurezas de Silicio, Fósforo, Azufre, Tungsteno, Arsénico, Selenio, Antimonio, Teluro y Bismuto.

En general se puede decir que los metales no son adecuados para este tipo de procesos mientras que los semiconductores ofrecen mayores promesas.

Existen factores adicionales para poder definir que elementos son los que van a ser utilizados, entre los principales están:

- a) Estabilidad química bajo las condiciones de operación.
- b) No deben oxidarse en presencia de aire, si tienden a oxidarse, deben aislarse.
- c) Resistencia mecánica adecuada.

El conjunto de elementos que constituyen los generadores se colocan dentro de una caja metálica, con una placa metálica gruesa como extremo caliente y sobre el cual se harán concentrar los rayos solares por medio de colectores parabólicos, los cuales tienen el objeto de producir una temperatura pareja y constante a lo largo de dicha placa. Todo el conjunto de elementos termoelectricos se coloca de tal forma que se tenga un contacto con la placa. En el extremo frío, es común que se tenga un cambiador de calor aletado, ya sea de aire o agua.

El principal problema en la conversión fototérmica es el de maximizar la energía absorbida del sol, y al mismo tiempo minimizar la energía que se disipa a los alrededores por cualquiera de las tres formas de transmisión de calor.

La tecnología que se tiene actualmente, hace posible que problemas relacionados con conducción y convección, sean solucionados de alguna manera; por lo cual el problema se reduce al diseño de un sistema de absorción que cumpla con las siguientes condiciones.

- 1) Alta absorción en el rango de la luz visible.
- 2) Baja emisividad en el infrarrojo.

Un sistema que cumpla con ambas condiciones es factible teóricamente, ya que como se ve en la Fig. 1.1.2.1.b.

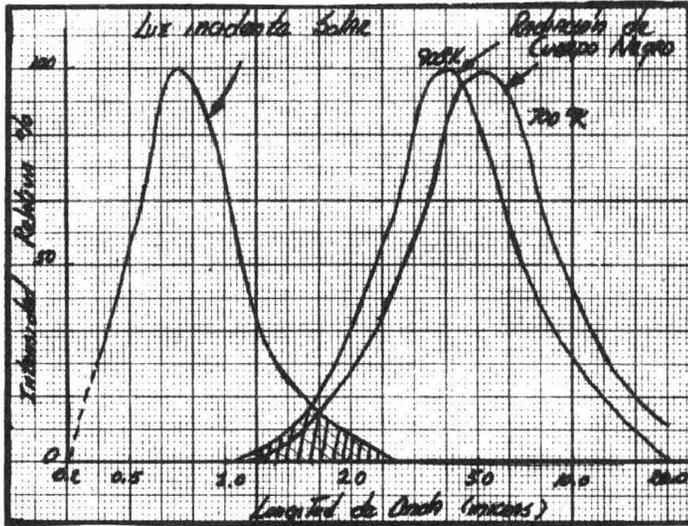


Fig. 1.1.2.1.b.

las zonas donde se traslapan las longitudes de onda importantes en cada proceso es muy pequeña.

Se conocen dos métodos, los cuales minimizan las pérdidas por radiación en el infrarrojo, éstos son:

- 1) Efecto de invernadero.
- 2) Superficies selectivas de absorción y radiación.

EFFECTO DE INVERNADERO.

Este efecto consiste en tener un absorbedor que sea negro en el rango visible debajo de una placa de un material que sea transparente en el mismo rango del espectro, y que además refleje total o parcialmente en el infra

rrojo.

El sistema dispuesto de tal forma, permite que la radiación solar llegue al absorbedor, donde se transforma en calor, y al mismo tiempo aquella radiación en el infrarrojo que se produce y disipa en el absorbedor, sea reflejada nuevamente hacia él, debido a la placa que se colocó por encima de aquel, que generalmente es de vidrio. Lo que a final de cuentas resulta en el aumento de la temperatura interna del sistema.

La absorbancia total del sistema descrito, puede mejorarse en el rango de la luz visible, si se escoje un absorbedor suficientemente negro y tratando además a la placa reflectora con capas no reflectoras.

La emisividad total del sistema en la región del infrarrojo, depende tanto de la emisividad en el infrarrojo de la superficie del absorbedor como de la reflectividad en esa misma zona del material de la cubierta. Si se tuviera un material que fuera reflector perfecto en el infrarrojo, no importaría la emisividad del absorbedor, cualquiera que ésta fuera; sin embargo, dado que este no es el caso, la emisividad de la superficie absorbidora es un factor muy importante si se desean lograr altas temperaturas en el sistema.

Para el caso de generación de energía eléctrica ya sea por el efecto termoeléctrico o por el termoiónico, donde se requieren de altas temperaturas, el sistema de invernadero, con cubiertas de vidrio tratado, no parece ofrecer por el momento gran futuro, ya que las pérdidas por radiación son -- demasiadas, resultando así una baja eficiencia. La solución utilizando este mismo sistema se encontrará al perfeccionarse los vidrios con alta reflectividad en el infrarrojo.

El campo donde el efecto de invernadero ha sido utilizado grandemente y que actualmente se encuentra en un plano competitivo con otras fuentes convencionales de energía, es en el de calentamiento de casas o edificios y calentamiento de agua. Esto se debe principalmente a que son fenómenos que no requieren de altas temperaturas, por lo cual sus pérdidas por radiación son pequeñas y que por tanto los colectores solares con absorbedores de baja selectividad son prácticos.

ABSORBEDORES SELECTIVOS.

Los absorbedores selectivos, fueron estudiados en 1940, desarrollándose varios tipos, sin embargo, los que más han sido perfeccionados son dos principalmente:

- a) Superficies absorbentes, que consisten en una delgada película de un semiconductor montada sobre un sustrato de algún metal específico
- b) Capas múltiples de interferencia.

SUPERFICIES ABSORBENTES.

Las superficies absorbentes aprovechan el hecho de que los semiconductores son transparentes en el infrarrojo, donde los fotones difícilmente logran excitar las transiciones de banda a banda.

Si se coloca una delgada película de un semiconductor sobre una superficie metálica (altamente reflectiva en el infrarrojo) el sistema formado tendrá una alta reflectancia selectiva. La luz visible al pasar es absorbida en la película del semiconductor, mientras que la radiación infrarrojo pa

sa la película, se refleja en la superficie metálica y vuelve a pasar a través del semiconductor casi sin ser absorbida. Por tanto la superficie aparece en negro en el rango visible, pero altamente reflectiva en el infrarrojo. El criterio de diseño para este sistema, es el dar un espesor a la película de semiconductor tal, que sea mayor a la longitud requerida para que sea absorbida la luz visible pero que a la vez sea más delgada que la longitud requerida para que se absorba el infrarrojo.

Para lograr ese efecto, en la práctica se recubre al semiconductor de varias capas de materiales antireflectivos, para disminuir su reflectividad en el rango de la luz visible; aparte es común colocar una barrera entre el semiconductor y el metal con el objeto de disminuir la difusión que ocurre a altas temperaturas y que ocasionaría una degradación óptica.

En 1950, se utilizaron superficies absorbentes integradas por una delgada capa de óxido de cobre, montada sobre una superficie de aluminio. Dichas superficies llegaron a tener una relación de absorbancia en el visible (a) entre emisividad en el infrarrojo (e) de aproximadamente 3.

Actualmente esta relación anda del orden de 15, en el sistema de Silicio sobre una superficie de Oro metálico; y se predicen relaciones a/e de aproximadamente 30, con materiales nuevos que se encuentran en investigación.

En la Fig. 1.1.2.1.c. se ve el sistema Silicio-Oro:

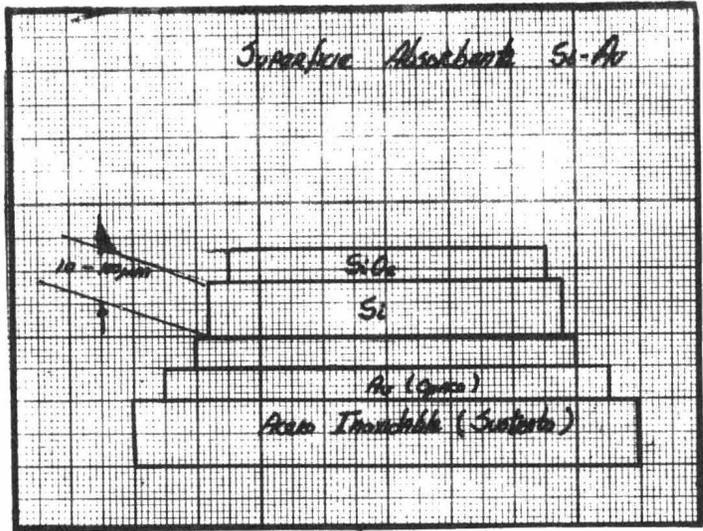


Fig. 1.1.2.1.c.

y en la Fig. 1.1.2.1.d. su comportamiento:

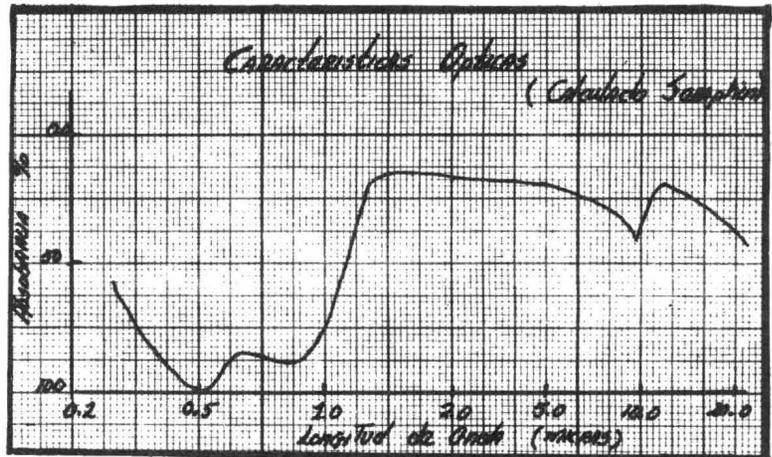


Fig. 1.1.2.1.d.

CAPAS MÚLTIPLES DE INTERFERENCIA.

Absorbedores selectivos pueden integrarse a partir de capas de metal-dieléctrico, de tal manera que casi cualquier perfil espectral puede generarse. Como ejemplos en la Fig. 1.1.2.1.e.

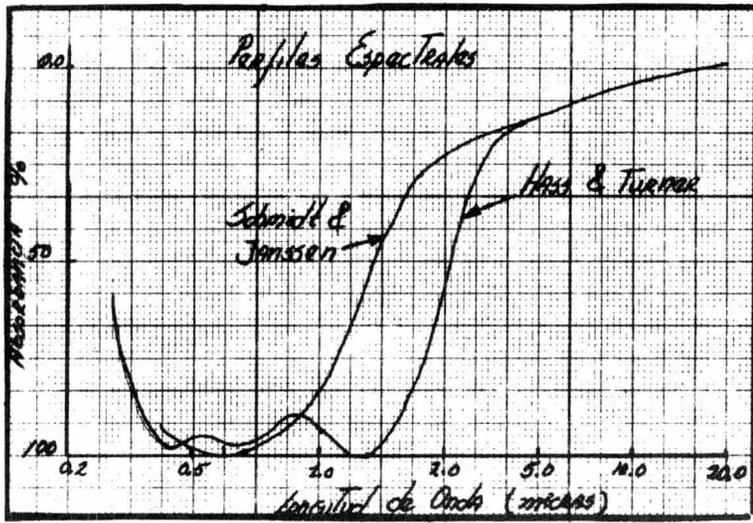


Fig. 1.1.2.1.e.

vemos los perfiles obtenidos por Hass y Turner y otro de Schmidt y Janssen; de éste último en la Fig. 1.1.2.1.f. vemos un corte a través de las capas.

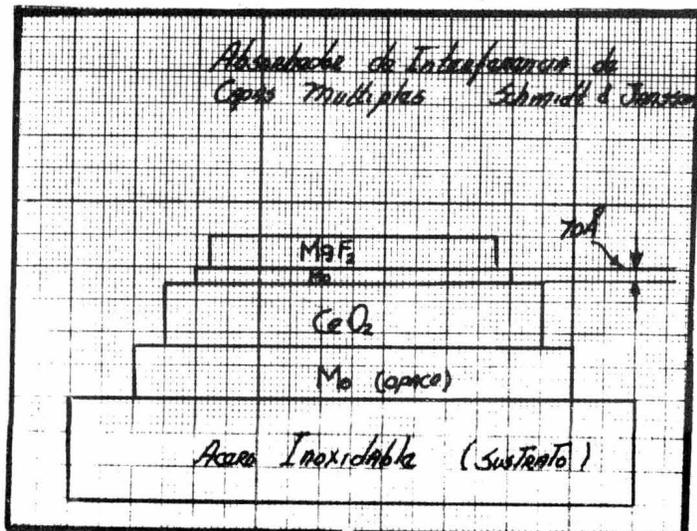


Fig. 1.1.2.1.f.

Con los conocimientos actuales, la relación antes mencionada de η a/e, llega a valores de 50, y se cree que en un futuro alcancen aproximadamente 60. Actualmente estos sistemas son investigados en varios laboratorios y universidades. A diferencia de los colectores-absorbedores que utilizan el efecto de invernadero, los de capas múltiples de interferencia, nunca han sido utilizados comercialmente.

1.1.2.2.- EFICIENCIA EN LOS COLECTORES FOTOTERMICOS.

Dependiendo principalmente de la temperatura, selectividad del absorbedor, aislamiento térmico, etc., el calor útil que puede extraerse de un colector fototérmico va desde 0% hasta casi 100% del calor incidente a dicho colector.

En forma general a bajas temperaturas, hay pocas pérdidas de calor y por tanto una alta eficiencia, mientras que a altas temperaturas existen pérdidas por radiación, conducción y convección, lo cual resulta en bajas eficiencias.

Como ejemplo para un colector operado a bajas temperaturas, Hottel y Howard consideraron un colector fijo, plano, usando absorbedores selectivos al vacío. El colector fue utilizado para calentar un fluido (agua) de 50°C a 100°C. Utilizando datos meteorológicos de El Paso, Texas, donde se efectuó el experimento y optimizando el ángulo del colector, la eficiencia teórica fue de un 60%. Se puede decir que para operaciones simples como calentamiento de agua o edificios, donde las temperaturas son menores, la eficiencia aumenta unos puntos.

Para el caso de operaciones a altas temperaturas, las eficiencias disminuyen considerablemente si no se utilizan absorbedores altamente selectivos y/o concentradores. Meinel realizó cálculos para varias condiciones de operación obteniendo la gráfica que se encuentra en la Fig. 1.1.2.2.a.

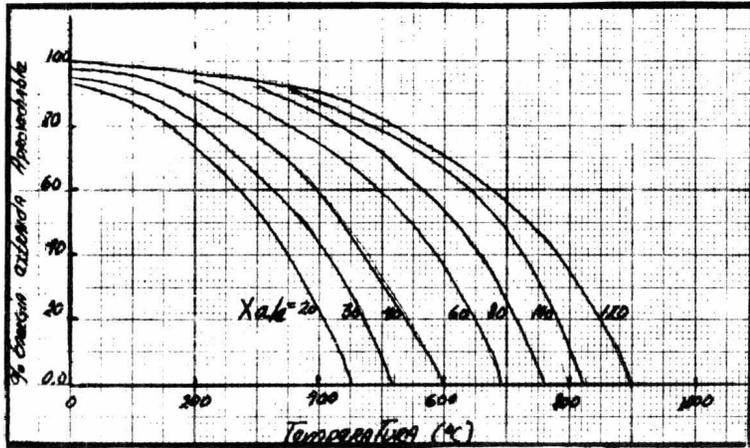


Fig. 1.1.2.2.a.

Estas gráficas ilustran que con las superficies actuales (a/e aproximadamente 15) se requiere de un alto grado de concentración. En las curvas de la gráfica, el factor X se refiere a consideraciones sobre el uso de espejos y lentes, tampoco se tomó en cuenta la posibilidad de captar la energía radiada del absorbedor por medio del efecto de invernadero.

Se puede decir en conclusión que el problema de la radiación en el infrarrojo que se produce en el absorbedor, no ha sido solucionado en su totalidad. Que los materiales y las técnicas actualmente utilizadas aparentemente son suficientes para hacer que los colectores que operan a bajas temperaturas, sean competitivos con otras fuentes de energía.

En el caso de operaciones que requieren de altas temperaturas como lo son los procesos termoeléctricos y termoiónicos, todavía no se tiene una tecnología lo suficientemente adecuada y avanzada como para hacerlos competitivos. Ya que aparte de que se deben minimizar las pérdidas en el infrarrojo, las superficies de los absorbedores no deben de degradarse a altas temperaturas y además deben de tolerar una variación periódica de temperaturas sumamente grande entre el día y la noche, se requiere en el día temperaturas del orden de 500°C a 1000°C, mientras que de noche y en determinadas condiciones la temperatura baja a 0°C o menos, lo cual implica grandes problemas de tipo mecánico, principalmente con los esfuerzos que se producen.

Para que los sistemas actuales resulten económicos, las superficies absorbedoras deben de tener o alcanzar vidas de varias décadas, se desconoce aún en gran medida la estabilidad de las capas altamente selectivas expuestas a temperaturas elevadas.

1.1.2.3.- CONCLUSIONES SOBRE LOS CONVERTIDORES TERMoeLECTRICOS

En general se les considera como intermediarios entre los convertidores fotoeléctricos y los fototérmicos. Como se mencionó anteriormente, consisten de dos metales, o dos semiconductores formando un circuito, en el cual la diferencia de temperaturas en su unión propicia la formación de una leve corriente eléctrica. Si se coloca una carga en algún lugar del circuito, se puede utilizar a la corriente generada para activar dicha carga. El fenómeno depende principalmente de los constituyentes (metales y semiconductores) y del gradiente de temperatura existente.

La forma de calcular qué tan apropiado es un material para su uso como convertidor termoelectrico es por medio de la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\alpha}{C \cdot \Omega}$$

donde: Z = número de mérito, $^{\circ}\text{K}^{-1}$

α = coeficiente de Seebeck $\text{v}/^{\circ}\text{K}$

Ω = Resistividad cm^{-1}

El factor $C \cdot \Omega$ es una constante para cada material dado bajo un rango de temperatura bastante amplio, por lo cual Z sólo depende del coeficiente de Seebeck.

En termopares metal-metal el valor más alto alcanzado por dicho coeficiente es de $100 \mu \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{K}}$, en semiconductores el valor aumenta hasta $1000 \mu \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{K}}$, sin embargo el valor de $C \cdot \Omega$ es mayor al que predice la ley de --

Wiedemann-Franz. Para maximizar Z para un semiconductor, se requiere controlar simultáneamente 3 parámetros, todos ellos función de la densidad de carga "N", dichos parámetros son:

- 1) Coeficiente de Seebeck $\alpha = f(N)$
- 2) $1/\Omega = Nes$; donde $e =$ carga eléctrica en Coulombs
 $s =$ movilidad de la carga en $\text{cm}^2/\text{V sec.}$
- 3) s

Estas dependencias han sido graficadas en la Fig. 1.1.2.3.a.

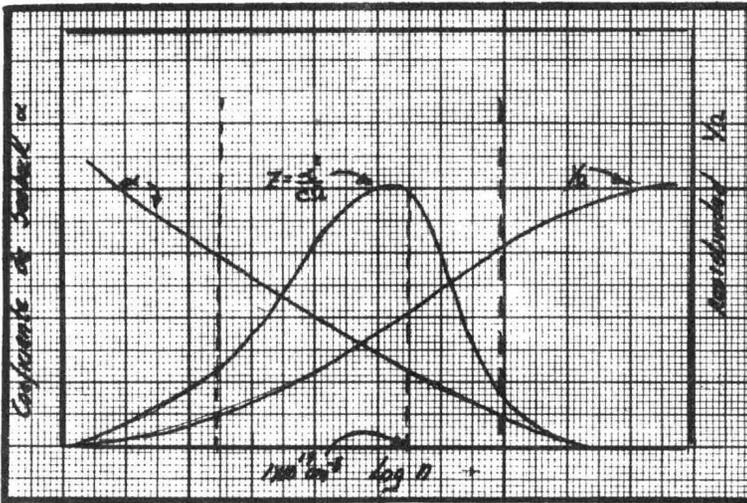


FIG. 1.1.2.3.a.

Dado que estos convertidores termoeléctricos funcionan como máquinas térmicas, el problema principal se reduce a encontrar materiales para los cuales Z pueda maximizarse y a la vez, que los termoelementos puedan ser utilizados a las mayores temperaturas posibles.

Se piensa que si se pudiera elevar el valor del coeficiente de - Seebeck por un factor de 3 y aumentar el valor de la temperatura a la cual funden los materiales de estos convertidores, la generación de energía por este proceso sería competitiva con otros medios de generación de electricidad.

Para concluir, se puede decir que los convertidores termoeléctricos no son por el momento la mejor solución, ya que las fotoceldas funcionan con mayores eficiencias y no necesitan de tantos requerimientos térmicos.

1.2. Captación de la Energía Térmica Solar
por medio de Colectores Planos.

1.2.1. Análisis y Diseño de un Sistema Calefactor
Solar para Agua de Servicio.

1.2.1.1. INTRODUCCION

Uno de los métodos más simples para aprovechar la energía térmica solar es su captación por medio de paneles. La energía térmica captada es transferida a un fluido (generalmente agua o aire) que sirve como medio de transporte de la misma. La energía térmica así transportada puede ser usada directamente o ser almacenada en diferentes formas. En el caso del agua se usan tanques perfectamente aislados y en el caso del aire, este es circulado a través de lechos de materiales de alta capacidad calorífica, que en ciclo al^{ternos}, captan del y ceden al aire la energía térmica.

Debido a que la existencia de condiciones climatológicas favora--bles es aleatoria, no puede asegurarse la entrega ininterrumpida de energía por el sistema solar, por lo cual se adopta el uso de un sistema doble complementario, en el que se coordina el calentador solar con un calentador --eléctrico o uno de gas. En condiciones favorables el calor necesario puede ser suministrado en su totalidad por el colector solar, usándose el calentador complementario únicamente cuando las condiciones climatológicas son desfavorables. Cuando se requieren temperaturas superiores a 80°C es preferi--ble usar el calentador solar únicamente para precalentar y agregar el calor restante con el calentador eléctrico o de gas, ya que los colectores de pa--nel trabajan muy ineficazmente por encima de tal temperatura debido a las --grandes pérdidas de calor que se presentan.

Las unidades colectoras constan de tres partes principales: un pa

nel metálico destinado a absorber la energía térmica radiada por el sol, un sistema de conducción del fluido transportador y un sistema de aislamiento de la unidad.

El objeto del presente trabajo es el de hacer el diseño de un colector solar de panel que resulte a la vez eficaz en la captación y transmisión de la energía térmica así como de bajo costo de producción. Diseñar un colector altamente eficaz resulta en un costo de producción elevado, lo que tiene a consecuencia un alto costo unitario del calor disponible. Un diseño barato puede resultar poco eficaz con la misma consecuencia final, por lo que deberá hacerse un análisis termodinámico del funcionamiento del colector para determinar las variables de diseño que influyen en su eficiencia y costo de producción y definir las de tal forma que el diseño proporcione el calor al menor costo.

El estudio se limita al diseño de un calentador solar de panel de agua para uso doméstico. Existen varios diseños^{1/} para este calentador, el que estamos analizando en este trabajo se basa en la forma presentada en la Fig. 1.2.1.1.

Existe una estrecha dependencia entre las tres partes integrantes del calentador solar de panel así como de sus características sobre la eficiencia y costo del mismo. Las características que influyen son tanto de los materiales de construcción como de diseño. Analizando brevemente las tres partes integrantes por separado, podemos mencionar las características principales de cada una de ellas.

El panel colector debe ser expuesto a los rayos del sol y absor--

ber su energía, por lo cual su emisividad debe ser alta. La eficacia del proceso de absorción es directamente proporcional a la conductividad térmica y grosor del panel; la unión que exista entre el panel y el sistema conductor del fluido debe ser íntima, para asegurar una buena transmisión de calor al fluido. Debe también procurarse un buen coeficiente de transferencia de calor entre la pared del ducto y el fluido. La eficacia del proceso de transmisión de calor al fluido decrece al aumentar la distancia de los ductos entre sí.

El sistema aislante se puede dividir en dos partes: aislamiento de la parte oculta al Sol y aislamiento de la parte con vista al Sol. En la primera las pérdidas de calor son debidas principalmente a transmisión por conducción y por lo tanto las características que influyen son el grosor y la conductividad térmica del aislante.

En la parte con vista al Sol las pérdidas de calor se producen principalmente por radiación y convección. Para acrecentar la absorptividad del panel generalmente se ennegrece su superficie, lo que causa también que aumente su emisividad y con ello la radiación que emite. El sistema generalmente usado es el de cubiertas transparentes y el material más indicado es el vidrio, ya que refleja la radiación infrarroja emitida de la superficie caliente del panel. La convección se limita con las cubiertas a la convección natural del aire contenido en el espacio entre la cubierta y el panel. Esta puede ser anulada extrayendo el aire, lo cual elevaría grandemente el costo de producción. Se han usado estructuras que limitan la circulación del aire en este compartimiento, pero con bajas en la transmisión-

de los rayos solares al panel por lo que la eficiencia del colector decrece y el costo de producción sube. El espacio entre el panel y la primera cubierta como entre las cubiertas restantes es de menor importancia, aunque resulta mayor eficiencia a mayor espaciamiento.

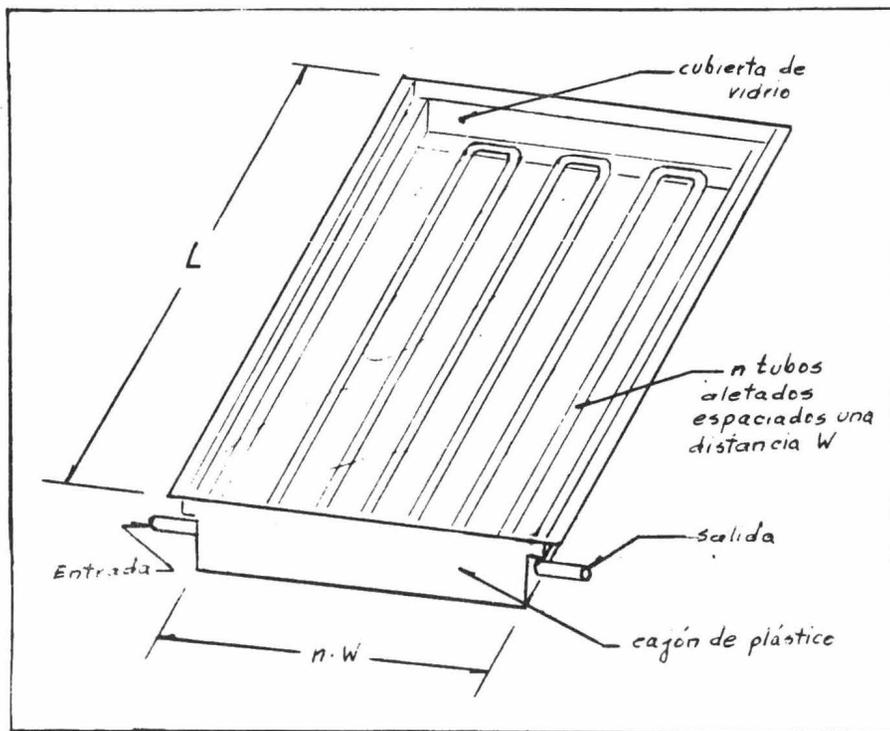


Fig.1.2.1.1. Calentador Solar de Panel

1.2.1.2.- ANALISIS Y DISEÑO DEL COLECTOR DE PANEL

Para el análisis y diseño se utilizó el método descrito por John A. Duffie y William A. Beckman^{2/} con algunas modificaciones para aplicarlo en este caso. La descripción del mismo se hace en el siguiente capítulo; para facilitar su explicación se presenta primero el diseño mecánico.

DISEÑO MECANICO

El diseño mecánico se hizo basándose en la disponibilidad y precio del material de construcción en México, con costos a nivel de una producción a gran escala.

Todo el sistema colector de los rayos solares se ha dividido en unidades que constan de las tres partes integrantes antes mencionadas.

Cada unidad es un cajón de plástico de 1 metro de ancho por 2 de largo y una altura de 10 cm. que cubre el piso y los lados y sostiene a su vez las cubiertas en la parte superior de la unidad. Está provisto de dos conexiones de agua que sirven para conectar las unidades entre sí. Este sistema tiene la ventaja de ser fácilmente transportable y con posibilidad de ser armado en el sitio donde será instalado. El área de captación puede ser ajustada aproximadamente a los requerimientos en cada caso.

Sistema colector y sistema conductor

Se describen ambas partes integrantes de la unidad juntas, ya que en el diseño establecido se han fusionado a un sólo sistema. Este sistema está integrado por tubos aletados individuales de 1.9 m de largo y que pueden ser conectados en serie, en caso de requerirse una temperatura moderadamente alta del agua (uso doméstico), o en paralelo si se requiere calentar grandes cantidades de agua unos cuantos grados (albercas). Los tubos aletados, ver Fig. 1.2.1.2.a., pueden ser extruidos en aluminio de tres mm de espesor. El ancho de la aleta es de 7.5 cm y el diámetro del tubo es de 1.27 cm (0.5 plg.).

Se ha elegido aluminio como metal de construcción para el panel, ya que entre los metales de mayor conductividad térmica (k_{Al} : 118 Btu/hft² (°F/ft)), es el de precio más bajo por su abundancia, además de ser más durable, si se evita la corrosión manteniendo el pH del agua ligeramente alcalino. Este punto se tratará posteriormente en forma más detallada.

Debido a que el agua que circula dentro de los colectores de aluminio debe ser tratada especialmente, se hace necesario el diseño de un circuito cerrado de agua que transporte el calor absorbido en los colectores al tanque de almacenamiento, donde es transferido al agua de servicio por medio de un intercambiador de calor.

A pesar de que el cobre posee varias ventajas sobre el aluminio, como son su mayor conductividad térmica, facilidad de soldadura con estaño, su precio es considerablemente más alto y esto limita mucho su uso en este tipo de equipos.

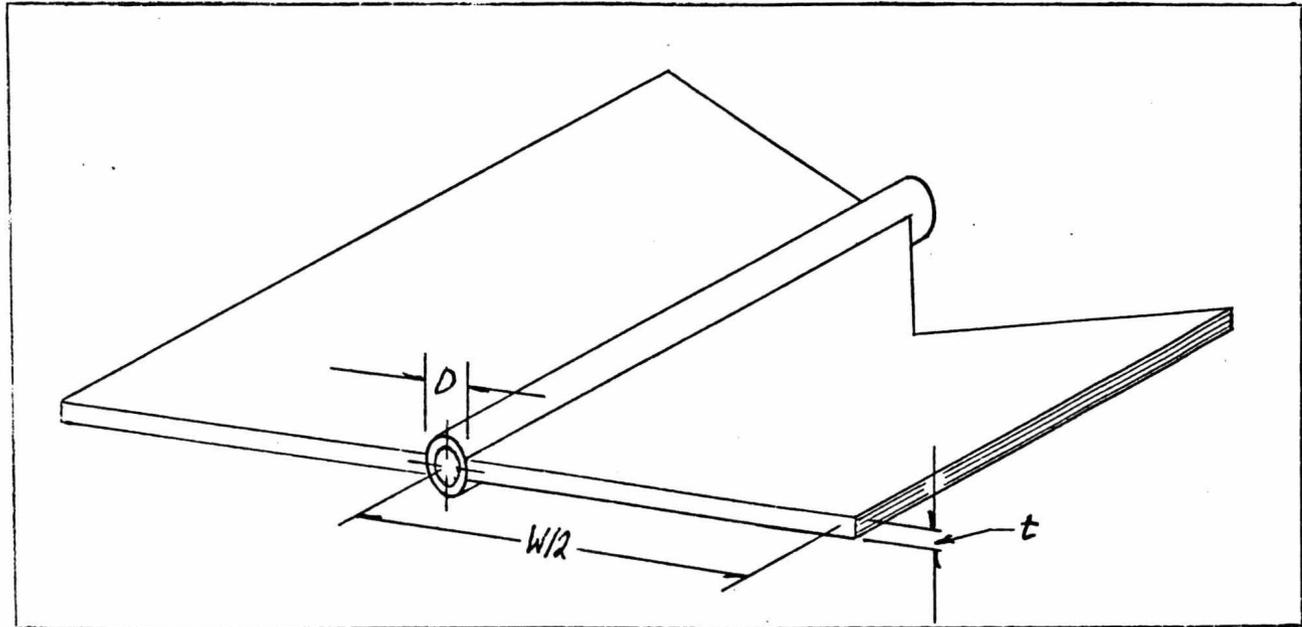


Fig. 1.2.1.2.a. Tubo de Aluminio Aletado

Fierro sería una alternativa posible, pero su conductividad térmica es aproximadamente la mitad de la del aluminio y su maquilación para este tipo de equipo resulta más cara. El aluminio presenta una ventaja en este aspecto, ya que puede ser extruido, como se mencionaba anteriormente, tubo y aleta en un solo cuerpo. De este modo se minimiza la resistencia al flujo del calor de la lámina captadora de la radiación solar al fluido que circula a través de los tubos.

La cara superior de los tubos aletados va cubierta de una delgada capa de pintura negro-mate resistente a la temperatura máxima esperada, que se presentaría si se llegara a interrumpir la circulación del agua a través de los paneles, como sería el caso de falla de la bomba de recirculación. El panel en estas condiciones puede llegar a calentarse hasta unos 400 °F (205 °C) aproximadamente. Se han hecho experimentos con pinturas negras especiales con absorptividades selectivas, que absorben la mayor parte de la radiación incidente y reemiten una mínima parte. Sin embargo se ha comprobado que el efecto selectivo no es permanente a causa de que la pintura se degrada. Estas pinturas son de costo generalmente elevado; por lo tanto resulta más económico aplicar una pintura común negro-mate resistente a la temperatura. Para mejorar este aspecto se recomienda secar la pintura una vez aplicada en un horno a una temperatura igual a la temperatura máxima de diseño.

B.1.2. Sistema de aislamiento.

El cajón de plástico proporciona una estructura que da rigidez a la unidad y a su vez proporciona el anclamiento para las cubiertas, así co-

mo protección de la intemperie. En la Fig. 1.2.1.2.b. se puede apreciar la forma especificada para el cajón.

El aislamiento en la parte inferior del cajón es efectuado por una placa de espuma de poliestireno de 5.08 cm (2 pgl) de espesor por un metro de ancho y dos de largo. (k_{pe} : 0.027 Btu/hft² (°F/ft)). En ella quedan troqueladas las formas de los tubos aletados como de sus conexiones proporcionándoles sujeción.

Los posibles materiales para las cubiertas son: vidrio, placas de acrílico transparente (poliester reforzado con fibra de vidrio) y otros - plásticos.

Algunos plásticos con costo similar al del vidrio no resisten la exposición al sol y a la intemperie por mucho tiempo.

Además los plásticos son transparentes a la radiación infrarroja emitida por el panel, haciéndolos menos efectivos para controlar las pérdidas de calor.

Por lo tanto el vidrio con su relativamente bajo costo; su resistencia a la intemperie y radiación solar y el hecho de que refleja la radiación infrarroja proveniente del panel, es el material más apropiado para las cubiertas.

Se recomienda pulir los cantos de la placa de vidrio interior, ya que pequeñas imperfecciones en el corte pueden estrellar la placa al subír-

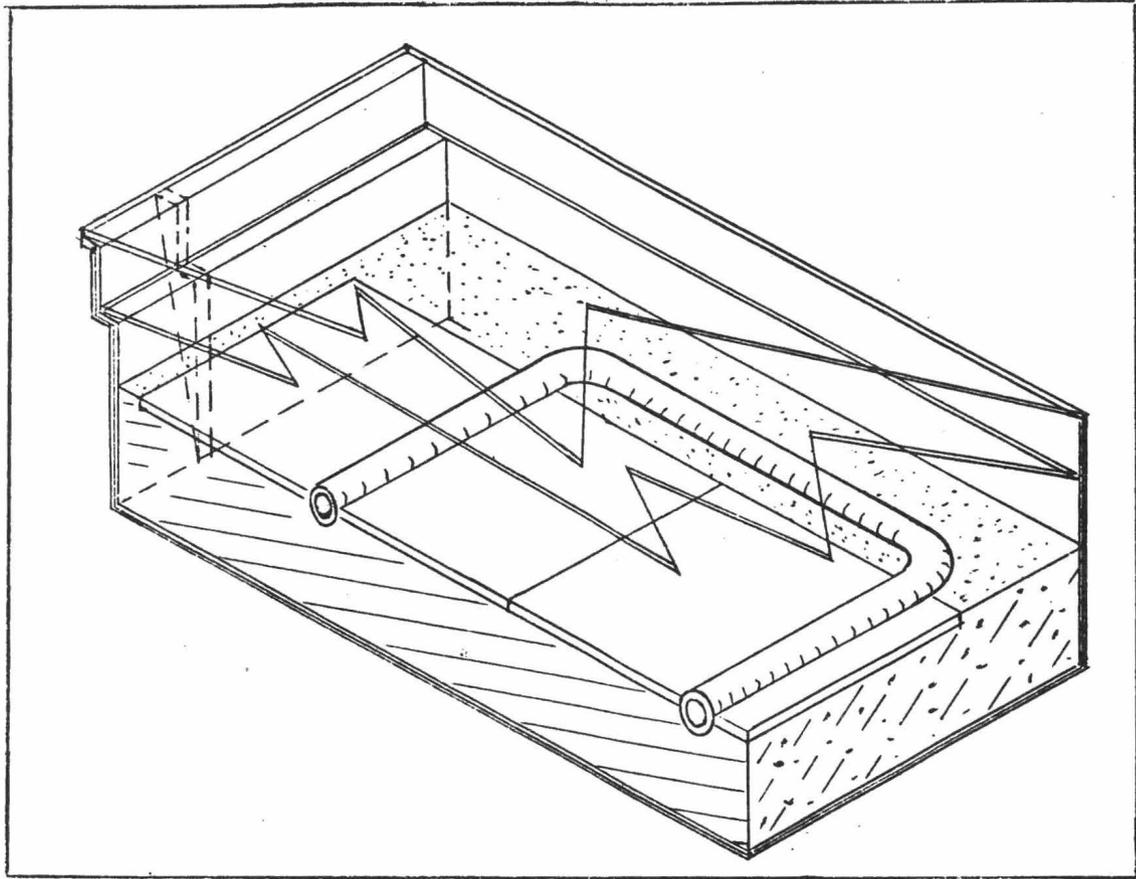


Fig.1.2.1.2.b. Vista Seccional del Colector Solar

su temperatura, debido a tensiones internas.

Las cubiertas de vidrio son dos y van sujetas en los anclamientos del cajón, procurando que la junta quede hermética para evitar la entrada de polvo o humedad que podrían afectar la transmitancia de las cubiertas -- así como la absorción de la radiación por el panel.

La cubierta exterior quedará al ras de la ceja del perfil que la sostiene para facilitar su lavado.

El vidrio utilizado para las cubiertas es vidrio plano con un contenido de óxido férrico de 0.08%. Un contenido mayor de dicho óxido proporciona al vidrio un color verdoso al corte y también una mayor absorbancia de los rayos solares, lo cual ocasiona que suba su temperatura y que por lo tanto la transmitancia de los rayos solares al panel disminuya. La transmitancia medida de este tipo de vidrio es de un $86^{+2}\%$, ya que depende del ángulo de incidencia de los rayos sobre la cubierta. El índice de refracción es de 1.56.

Se usarán placas de este tipo de vidrio de 3 mm de espesor por 1m de ancho y 2m de largo.

CONTROL DE CORROSION

Con el fin de evitar la corrosión por efectos galvánicos es necesario aislar cada uno de los elementos de un sistema que contenga agua, - - cuando éstos sean de metales diferentes.

Es posible usar ánodos de sacrificio de magnesio para proteger - zinc, acero o fierro, latones, cobre, bronce, etc. Sin embargo esto no -- protege al aluminio.

En el sistema diseñado en este trabajo se logra el aislamiento ne cesario entre los elementos de diferente metal, haciendo las conexiones entre uno y otro por medio de manguera de polietileno de baja densidad. Este material resulta adecuado para tal servicio, ya que es resistente a las tem peraturas de operación y a ser expuesto a la intemperie.

Los elementos metálicos que constituyen el sistema son:

Tubos aletados de aluminio.

Tubería de cobre.

Intercambiador de calor de serpentín de tubo de cobre.

Bomba de fierro y bronce.

En la corrosión debida a salinidad del agua intervienen varios -- factores: electrolitos diferentes a los que constituyen la dureza y alcalinidad del agua, causan corrosión debido a que destruyen las capas de óxido que actúan como protectoras del metal (por ejemplo cloruros y sulfatos).

Estos agentes reducen así mismo la relativa protección que ofrecen delgadas películas depositadas de carbonato de calcio.

Desde el punto de vista de control de corrosión, los parámetros de calidad del agua pueden ser clasificados como favorables y desfavorables.

En general, los siguientes 7 parámetros de calidad del agua ayudan al control de la corrosión:

- 1.- Ca^{++}
- 2.- HCO_3^-
- 3.- PO_3^- (ión metafosfato)
- 4.- HPO_4^- (ión fosfato monohidrogenado)
- 5.- SiO_2 (sílica)
- 6.- Color orgánico.
- 7.- $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (borax, muy soluble en agua)

En general, los siguientes 14 parámetros de calidad del agua dificultan el control de corrosión y deben ser eliminados:

- 1.- Oxígeno disuelto
- 2.- sulfuros.
- 3.- latón
- 4.- Mg^{++} (en sistemas que contengan Al.)
- 5.- Cl^-
- 6.- SO_4^-
- 7.- NO_3^-

8.- CO_3^{\equiv}

9.- H^- (El pH ácido contribuye a la corrosión).

10.- OH^- (El pH alcalino contribuye a la corrosión).

11.- Cu^{++}

12.- Co^{++}

13.- Ni^{++}

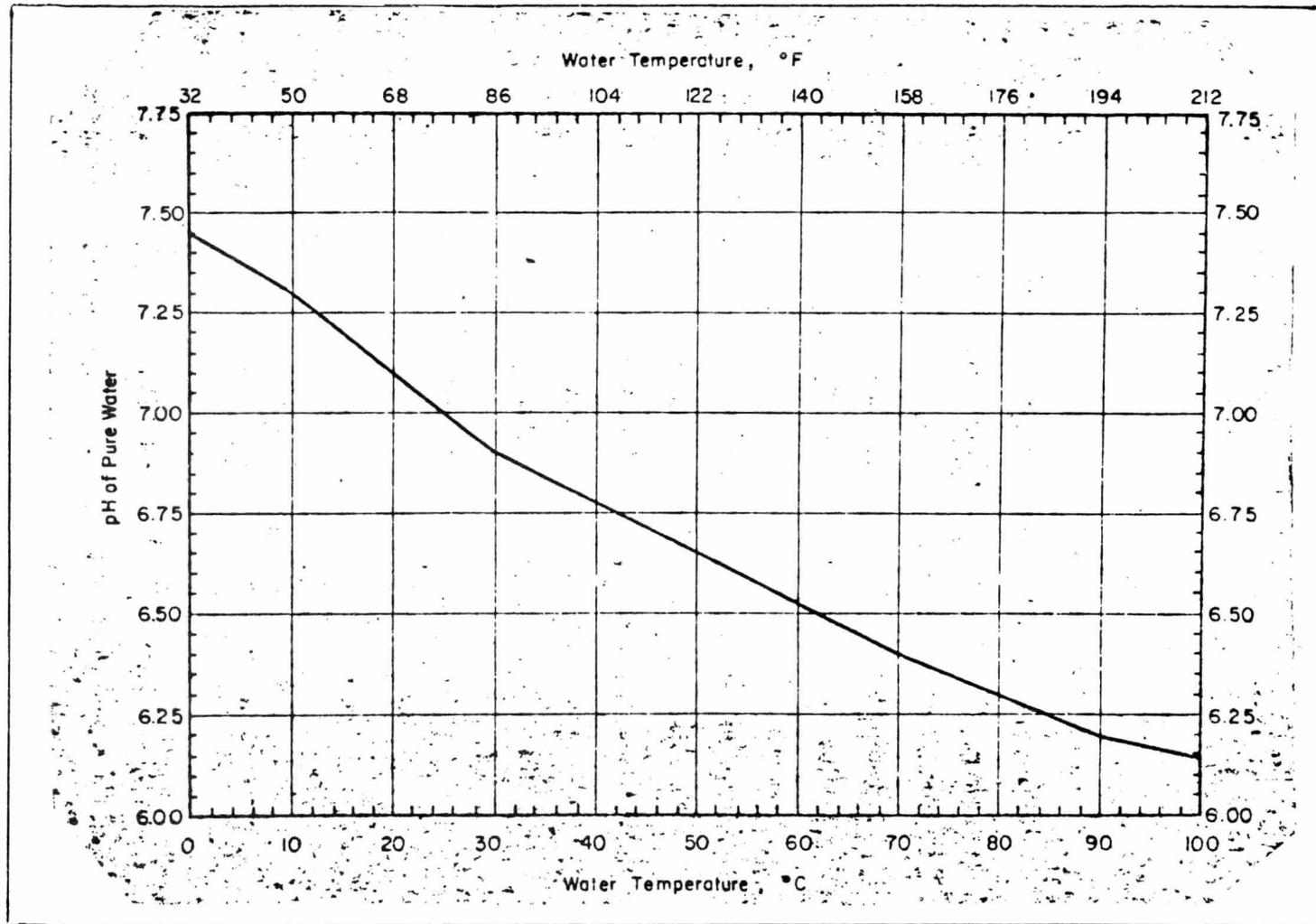
14.- Pb^{++}

El pH del agua deberá mantenerse ligeramente alcalino a cualquier temperatura. La gráfica 1.2.1.2.a. presenta el pH del agua en función de su temperatura.

La corrosión se produce más rápido en soluciones ácidas. El cobre se corroe en soluciones de bajo pH y altas concentraciones de sulfuros, cloruros y nitratos.

Las aguas ácidas conteniendo cloruros son especialmente corrosivas para el aluminio. Las soluciones de sulfatos de bajo pH son así mismo corrosivas para el aluminio, pero no tanto como las anteriores. Si el agua contiene trazas de compuestos de metales tales como cobre, plomo, latón, níquel y cobalto, estos metales pesados tienden a provocar ataques localizados especialmente si el pH se encuentra por abajo del punto neutro. En resumen, se recomienda mantener el pH del agua que circula en el sistema con un pH entre 7 y 8.5, medido a 25°C.

La corrosión se minimiza si la concentración de oxígeno disuelto en el agua es igual a cero. Si el agua del sistema no se aerea continua--



Gráfica.1.2.1.2.a. pH de Agua Pura en Función de la Temperatura

mente, el oxígeno disuelto se agota al oxidar los metales presentes.

Se ha comprobado que velocidades de diseño del fluido transportador del calor mayores a 3 ft/s en los colectores de aluminio aceleran la corrosión de los mismos.

La velocidad de diseño en el sistema considerado en este trabajo es de 2 ft/s.

Se recomienda usar etilenglicol o galato de propilo como agente anticorrosivo en el circuito cerrado de agua en el sistema. Protege todos los tipos de metales en el sistema de corrosión y oxidación, incluyendo el aluminio. Se debe usar una proporción de al menos 33% de etilenglicol para alcanzar resultados satisfactorios.

El etilenglicol se usa también como anticongelante, en regiones frías.

Para evitar ataques galvánicos debidos a partículas de otros metales que puedan ser introducidos a los colectores de aluminio se recomienda el uso de un filtro.

Para evitar el acceso de iones de cobre o fierro a los colectores, que podrían depositarse reaccionando y desplazando al aluminio, se recomienda el uso de una trampa iónica instalada en el circuito cerrado después del filtro y antes de los colectores de aluminio. La trampa iónica consta de un alambre delgado de aluminio en espiral que se pone dentro de la corrien

te de agua. Los iones atacan al alambre que de esta manera brinda protección al metal de los ductos en los colectores de aluminio. El alambre es - fácilmente sustituible una vez agotado.

ASPECTO TERMOSOLAR

Datos de Radiación Solar y Climatológicos

Para hacer un análisis termodinámico del colector de panel es necesario disponer de datos climatológicos así como datos de la radiación solar de la zona en estudio, ya que esta información puede variar significativamente de un lugar a otro.

Los datos climatológicos de importancia para este estudio son: - temperaturas ambientales durante el día y velocidad del viento sin importar su dirección.

Los datos necesarios para poder hacer una estimación de la radiación solar incidente en diferentes momentos sobre el panel son los de radiación total H_t , radiación directa H_i y radiación difusa H_d . Se entiende por radiación directa o rayo incidente aquella que no sufre ningún cambio de dirección en su paso por la atmósfera, radiación difusa la que recibe indirectamente después de sufrir reflexiones y difusión en la atmósfera. La radiación total es la suma de estas dos ^{3/}.

Las condiciones de la atmósfera juegan un importante papel, entre ellas la nubosidad, la humedad, la cantidad de polvo, etc.. Las mediciones

de radiación son generalmente hechas sobre superficies horizontales. Se ha comprobado que se alcanza una eficiencia mayor en la captación de la energía térmica solar a largo plazo, es decir, operando durante todo el año, si los paneles se encuentran dirigidos viendo hacia el ecuador y con una inclinación igual a la latitud geográfica del lugar donde se operan. Es por ello que los datos de radiación total H_t disponibles deben ser corregidos por un factor $R \frac{4}{}$, con el fin de obtener la radiación total real HR_t incidente sobre el panel. El factor R toma en cuenta tanto la fracción del total FH_i que corresponde a la radiación directa, su corrección angular R_i -- por inclinación del panel, la fracción correspondiente a la radiación difusa FH_d y la fracción correspondiente a la radiación reflejada por el suelo y sus alrededores.

Los factores antes mencionados se definen de la siguiente manera:

$$HR_t = H_t \cdot R \quad \text{ec. 1}$$

$$R_i = \frac{\cos(\phi-s)\cos\delta \cos\omega + \sin(\phi-s)\sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta} \quad \text{ec. 2}$$

$$R = FH_i \cdot R_i + FH_d \cdot \frac{1 + \cos s}{2} + \frac{(1 - \cos s) \cdot P}{2} \quad \text{ec. 3}$$

donde:

- ϕ latitud geográfica (se tomó como 20° L.N.)
- s inclinación del panel con respecto a la horizontal
- δ declinación del sol (función del día a lo largo del año).
- ω hora solar en grados
- P reflectancia del suelo y sus alrededores

Ya que el clima en determinado lugar sigue aproximadamente un patrón anual, es posible estimar la operación anual del colector basándose en datos climatológicos de un solo año. Los cálculos se harán con datos horarios para mayor precisión en la estimación 5/, y refiriéndose a un día de cada mes del año.

Como se aprecia de las gráficas de radiación total promedio diaria para un mes 6/, ésta no varía considerablemente a lo largo del mismo, - siendo mucho más marcada la variación a lo largo del día. El factor R_i es función de la hora solar y de la declinación, cuya variación es pequeña a lo largo de un mes. Esto justifica el hacer los cálculos para un solo día representativo del mes.

Los datos de temperatura ambiente y de velocidad del viento fueron proporcionados por el Observatorio de Tacubaya y las mediciones de radiación fueron hechas en la U.N.A.M. 7/.

Para el cálculo de la declinación del sol en función del día del año se utilizó la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad \text{ec. 4.}$$

donde: n: día del año

A continuación se presentan en tablas los siguientes datos:

Tabla 1.2.1.2.a. Velocidad del viento en el D. F.

- a) promedio mensual basado en los años 61-70
- b) máxima en el mes
- c) mínima en el mes

Tabla 1.2.1.2.b. Temperatura Ambiente en el D.F.

- a) promedio mensual
- b) máxima en el mes
- c) mínima en el mes

Tabla 1.2.1.2.c. Radiación medida sobre superficie horizontal H_t , fracciones correspondientes a radiaciones directa y difusa, factor de corrección R y radiación total incidente sobre su superficie inclinada HR_t , de un día representativo para cada mes del año.

METODO Y ANALISIS MATEMATICOS

Balance General de Energía

Para hacer el análisis matemático del funcionamiento del colector se parte de un balance general de energía en el mismo. El balance básico - de energía queda expresado en la siguiente ecuación:

$$A_c \cdot H_t \cdot R \cdot (\tau \cdot \alpha)_c = Q_u + Q_p + Q_a \quad \text{ec. 5}$$

donde:

$H_t R (\tau \cdot \alpha)_c$: radiación incidente sobre la superficie del panel, por unidad de tiempo y área

$$H_t R (\tau \cdot \alpha)_c = S$$

$(\tau \cdot \alpha)_c$: producto transmitancia-absortancia del sistema de cubiertas

Tabla 1.2.1.2.a. Promedios mensuales de Velocidad del Viento
(Velocidad en m/s)

Mes	E	F	M	A	M	J
V _{prom.}	1.61	1.79	2.00	2.10	1.93	1.67
V _{máx.}	2.60	3.20	3.00	3.50	3.10	2.30
V _{mín.}	1.00	1.10	1.20	0.90	0.90	1.10
Mes	J	A	S	O	N	D
V _{prom.}	1.63	1.46	1.36	1.50	1.52	1.72
V _{máx.}	2.70	2.00	2.00	2.00	2.30	2.90
V _{mín.}	1.20	0.50	1.10	0.90	0.80	1.00

Tabla 1.2.1.2.b. Promedios mensuales de Temperatura Ambiente
(Temperatura en °C)

Mes	E	F	M	A	M	J
T _{prom.}	13.0	14.6	16.7	18.2	18.4	17.6
T _{máx.}	26.2	28.8	30.8	32.2	31.6	30.9
T _{mín.}	-1.0	0.2	2.2	4.5	7.0	8.5
Mes	J	A	S	O	N	D
T _{prom.}	16.2	16.3	16.0	15.0	13.9	13.2
T _{máx.}	26.9	27.1	26.0	26.7	26.0	25.5
T _{mín.}	7.5	6.4	4.7	3.4	0.5	-0.4

Tabla 1.2.1.2.c.

Mes Enero n 15							Febrero 46				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	12.50	0.50	0.50	1.34	16.67	16.67	0.63	0.37	1.23	20.42
8-9	+52.5	20.83	0.80	0.20	1.31	27.29	22.92	0.80	0.20	1.19	27.92
9-10	+37.5	29.17	0.86	0.14	1.26	36.67	45.83	0.77	0.23	1.15	52.50
10-11	+22.5	50.0	0.67	0.33	1.17	58.33	58.33	0.86	0.14	1.15	67.08
11-12	+ 7.5	66.67	0.56	0.44	1.13	75.21	79.17	0.76	0.24	1.12	88.16
12-13	- 7.5	70.83	0.53	0.47	1.12	79.17	81.25	0.82	0.18	1.14	92.71
13-14	-22.5	66.67	0.57	0.43	1.14	76.04	79.17	0.79	0.21	1.13	89.79
14-15	-37.5	54.17	0.65	0.35	1.19	64.58	72.92	0.63	0.37	1.11	81.25
15-16	-52.5	45.83	0.55	0.45	1.21	55.42	66.67	0.69	0.31	1.16	77.5
16-17	-67.5	31.25	0.53	0.47	1.36	42.50	50	0.67	0.33	1.24	62.29

Tabla 1.2.1.2.c. (continuación)

Mes Marzo n 74							Abril 105				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	18.75	0.67	0.33	1.07	20.21	16.67	0.63	0.37	0.94	15.83
8-9	+52.5	33.33	0.75	0.25	1.07	35.83	35.42	0.94	0.06	0.97	34.58
9-10	+37.5	62.50	0.80	0.20	1.07	67.08	64.58	0.77	0.23	0.99	63.96
10-11	+22.5	79.17	0.79	0.21	1.07	84.79	79.17	0.79	0.21	1.00	79.17
11-12	+ 7.5	83.33	0.80	0.20	1.06	88.75	83.33	0.80	0.20	1.00	83.33
12-13	- 7.5	91.67	0.86	0.14	1.07	98.13	83.33	0.75	0.25	1.00	83.33
13-14	-22.5	85.42	0.83	0.17	1.08	91.88	70.83	0.77	0.23	1.00	70.83
14-15	-37.5	79.17	0.79	0.21	1.07	84.79	62.50	0.80	0.20	0.99	62
15-16	-52.5	68.75	0.79	0.21	1.08	74.17	50	0.75	0.25	0.98	48.75
16-17	-67.5	47.92	0.61	0.39	1.07	51.25	31.25	0.67	0.33	0.94	29.38

Tabla 1.2.1.2.c. (continuación)

Mes Mayo n 135							Junio 166				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	25	0.75	0.25	0.85	21.25	18.75	0.67	0.33	0.83	15.63
8-9	+52.5	47.92	0.74	0.26	0.91	43.75	41.67	0.50	0.50	0.91	38.13
9-10	+37.5	64.58	0.77	0.23	0.94	60.63	62.50	0.80	0.20	0.91	56.88
10-11	+22.5	79.17	0.79	0.21	0.95	75.21	77.71	0.76	0.24	0.93	71.67
11-12	+ 7.5	81.25	0.80	0.20	0.96	77.71	77.71	0.78	0.22	0.94	71.67
12-13	- 7.5	79.17	0.79	0.21	0.96	76.04	68.75	0.79	0.21	0.94	64.58
13-14	-22.5	66.67	0.75	0.25	0.95	63.54	62.50	0.77	0.23	0.93	58.33
14-15	-37.5	54.17	0.69	0.31	0.94	51.04	50	0.71	0.29	0.92	45.83
15-16	-52.5	45.83	0.73	0.27	0.91	41.67	37.5	0.67	0.33	0.90	33.33
16-17	-67.5	29.17	0.57	0.43	0.88	25.63	29.17	0.57	0.43	0.85	25

Tabla 1.2.1.2.c. (continuación)

Mes Julio n 196							Agosto 227				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	r	Hr_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	r	Hr_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	18.75	0.67	0.33	0.84	15.83	16.67	0.63	0.37	0.91	15.21
8-9	+52.5	25	0.67	0.33	0.90	22.29	31.25	0.80	0.20	0.94	29.17
9-10	+37.5	37.50	0.44	0.56	0.95	35.42	47.92	0.74	0.26	0.97	46.25
10-11	+22.5	41.67	0.35	0.65	0.96	40	58.33	0.86	0.14	0.98	56.88
11-12	+7.5	41.67	0.35	0.65	0.96	40	83.33	0.75	0.25	0.98	81.67
12-13	-7.5	50	0.30	0.70	0.96	47.92	77.71	0.81	0.19	0.98	75.83
13-14	-22.5	45.83	0.36	0.64	0.96	43.75	66.67	0.75	0.25	0.98	65
14-15	-37.5	35.42	0.47	0.53	0.94	33.33	54.17	0.66	0.34	0.97	52.50
15-16	-52.5	29.17	0.57	0.43	0.91	26.67	45.83	0.55	0.45	0.95	43.75
16-17	-67.5	19.17	0.02	0.98	0.97	18.75	33.33	0.62	0.38	0.91	30.21

Tabla 1.2.1.2.c. (continuación)

Mes Septiembre n 258							Octubre 288				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	16.67	0.63	0.37	1.01	16.67	14.58	0.57	0.43	1.15	16.67
8-9	+52.5	31.25	0.67	0.33	1.02	31.88	30.42	0.68	0.32	1.12	34.17
9-10	+37.5	50	0.71	0.29	1.03	51.46	47.92	0.74	0.26	1.11	53.33
10-11	+22.5	66.67	0.69	0.31	1.03	68.75	66.67	0.72	0.28	1.10	73.33
11-12	+ 7.5	77.71	0.68	0.32	1.03	79.17	76.25	0.87	0.13	1.12	85.42
12-13	- 7.5	70.83	0.70	0.30	1.03	72.92	77.71	0.81	0.19	1.11	85.42
13-14	-22.5	62.50	0.63	0.37	1.03	64.17	70.83	0.71	0.29	1.10	77.71
14-15	-37.5	50	0.75	0.25	1.04	51.88	62.50	0.73	0.27	1.11	69.17
15-16	-52.5	37.50	0.67	0.33	1.02	38.33	50	0.70	0.30	1.12	56.25
16-17	-67.5	25	0.50	0.50	1.01	25	31.25	0.75	0.25	1.20	37.50

Tabla 1.2.1.2.c. (continuación)

Mes Noviembre n 319							Diciembre 349				
Hora	ω	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²	H_t cal/hcm ²	FH_i	FH_d	R	HR_t cal/hcm ²
7-8	+67.5	14.58	0.57	0.43	1.33	19.17	12.50	0.50	0.50	1.39	17.50
8-9	+52.5	29.17	0.71	0.29	1.24	36.25	29.17	0.71	0.29	1.31	38.33
9-10	+37.5	47.92	0.74	0.26	1.19	57.29	45.83	0.77	0.23	1.25	57.29
10-11	+22.5	62.50	0.77	0.23	1.18	73.75	60.41	0.83	0.17	1.24	74.58
11-12	+ 7.5	77.71	0.87	0.13	1.19	92.08	77.71	0.76	0.24	1.20	92.50
12-13	- 7.5	70.83	0.71	0.29	1.15	81.62	70.83	0.71	0.29	1.18	83.75
13-14	-22.5	62.50	0.73	0.27	1.17	72.92	62.50	0.67	0.33	1.18	73.96
14-15	-37.5	52.50	0.67	0.33	1.18	61.46	50	0.71	0.29	1.23	61.67
15-16	-52.5	37.50	0.67	0.33	1.22	45.83	31.25	0.70	0.30	1.30	40.63
16-17	-67.5	18.75	0.61	0.39	1.35	25.42	25	0.50	0.50	1.39	34.79

Ac : área del colector

Qu : flujo de calor transferido al fluido por unidad de tiempo. Calor útil.

Qp : pérdidas de calor por radiación, convección y conducción. Pérdidas por reflexión en la cubierta se consideran en el producto $(\gamma \cdot \alpha)_c$.

Qa : calor acumulado

Para poder conocer el flujo de calor transferido al fluido es necesario calcular el lado izquierdo de la ecuación 5, a partir de los datos de radiación y de las características del material de la cubierta, así como estimar las pérdidas de calor.

El calor acumulado en el colector es igual a cero al tratarse de una operación continua. Sin embargo en este caso no se trata de una operación estrictamente continua, ya que puede haber variaciones en la cantidad de radiación incidente sobre el panel, debidas a condiciones atmosféricas, que pueden causar cambios de temperatura en el panel. Igualmente existen lapsos de transición en la mañana cuando se calienta el panel al salir el sol y en la tarde cuando se enfría al ocultarse el sol. Sin embargo, el calor acumulado por el panel en la mañana es cedido al fluido al atardecer. Una cosa similar ocurre con los cambios de temperatura durante el día. La fracción del calor acumulado que se aprovecha como calor útil y la fracción que se pierde, depende del diseño del colector y sus características, lo que se toma en cuenta a través de algunos factores definidos más adelante y que a fin de cuentas determinan la eficacia con que opera el colector.



El cálculo de la radiación incidente es directo, no así la estimación de las pérdidas de calor.

Coeficiente de Transferencia de Calor Externo

Para efectuar la estimación de las pérdidas de calor se definió un coeficiente total de transferencia de calor del colector hacia el exterior:

$$Q_p = U_p \cdot A_c \cdot (T_p - T_a) \quad \text{ec. 6}$$

$$U_p = U_F + U_S \quad \text{ec. 7}$$

donde:

U_p : coeficiente de pérdida de calor

U_F : coeficiente de transferencia de calor del fondo del colector

U_S : coeficiente de transferencia de calor de la parte superior del colector

T_p : temperatura del panel

T_a : temperatura ambiente

La pérdida de calor por el piso del colector es debida a conducción y se considera flujo unidireccional de calor. Por lo tanto la pérdida de calor por el fondo del colector dependerá únicamente de la resistencia que ofrece el material de construcción al paso del calor, por lo que:

$$U_F = 1/R_1 = k_a/L_a \quad \text{ec. 8}$$

donde: k_a : conductividad térmica del aislante

L_a : espesor del aislante

Las pérdidas de calor por las orillas del colector son despreciables.

Para estimar las pérdidas de calor en la parte superior del colector, o sea, a través de las cubiertas, se considera flujo de calor por convección y radiación entre placas paralelas.

El flujo de calor por las cubiertas puede considerarse como una serie de tres pasos diferentes:

$$q_{p,c1} = q_{c1,c2} = q_{c2,a} = U_s (T_p - T_a)$$

$$U_s = 1/(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = T_p - T_a$$

$$\Delta T_1 = T_p - T_{c1}$$

$$\Delta T_2 = T_{c1} - T_{c2}$$

$$\Delta T_3 = T_{c2} - T_a$$

donde: $q_{p,c1}$: flujo de calor entre el panel y la primera cubierta.
 $q_{c1,c2}$: Flujo de calor entre ambas cubiertas
 $q_{c2,a}$: Flujo de calor entre la cubierta exterior y la atmósfera.

En los tres pasos se considera transferencia por radiación a la temperatura y emisividad correspondiente y transferencia por convección natural entre planos inclinados en los dos primeros y convección forzada en -

el último, ya que intervienen los movimientos de la atmósfera.

Un análisis detallado de los tres pasos es presentado por Duffie y Beckman, complementado con ejemplos numéricos 8/.

Klein en 1973 desarrolló una ecuación empírica que representa las gráficas experimentales de U_s en un rango de temperaturas de 40 a 130°C dentro de un límite de error de máximo 2% 9/. Dicha ecuación calcula el valor de U_s para una inclinación de 45°, aunque el mismo autor presenta un método para corregir dicho valor a la inclinación deseada.

En este trabajo se utilizó dicha ecuación, que se presenta a continuación, ya que facilita los cálculos de U_s :

$$U_s = \left(\frac{N}{344/T_p \left((T_p - T_a)/(N+f) \right)^{0.31}} + \frac{1}{h_v} \right)^{-1} + \frac{\nabla \cdot (T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.0425N(1 - \epsilon_p))^{-1} + (2N + f - 1)/\epsilon_g - N}$$

ec. 9

donde: h_v : coeficiente de transferencia de calor por convección debida al viento

$$h_v = 5.7 + 3.8v \quad v: \text{vel. del viento}$$

$$f = (1 - 0.04h_v + 5 \cdot 10^{-4} h_v^2)(1 + 0.058N)$$

N : número de cubiertas

∇ : constante de Boltzmann

ϵ_p : emisividad del panel

ϵ_g : emisividad del vidrio

$$\frac{U_s(s)}{U_s(45)} = 1 - (s - 45)(0.00259 - 0.00144 \epsilon_p) \quad \text{ec. 10}$$

Eficiencia del Colector

Para estimar la eficiencia del colector se definieron varios factores en función de las características tanto de los materiales de construcción como de diseño del mismo^{10/}.

Basándose en la resistencia que ofrece cada parte integrante del colector al calor en su paso del panel colector (aleta) hasta el fluido, cada factor presenta la influencia que ejerce cada variable sobre la eficiencia general.

Todos los factores serán presentados sin deducción, encontrándose la misma en la referencia diez.

Eficiencia standar de una aleta

La eficiencia standar de una aleta está dada por la siguiente -- ecuación:

$$F = \frac{\tanh \left(\frac{m \cdot (W-D)/2}{m \cdot (W-D)/2} \right)}{m \cdot (W-D)/2} \quad \text{ec. 11}$$

donde: W : distancia entre centros de tubos

D : diámetro externo del tubo

$$m = \sqrt{U_p / k \cdot t} \quad \text{ec. 12}$$

U_p : coeficiente total de transferencia de calor al exterior - del colector

t : espesor de la lámina

k : conductividad térmica del material de la lámina

Factor de eficiencia del colector

Basándose en la eficiencia de transferencia de calor de la aleta y considerando la energía térmica incidente sobre la superficie superior de los tubos, así como la resistencia presentada al flujo de calor por la unión entre el tubo y la aleta y el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la pared del tubo, se define el factor de eficiencia del colector F' como:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_p}}{W \cdot \left(\frac{1}{U_p (D + (W-D)F)} + \frac{1}{C_u} + \frac{1}{\pi \cdot D \cdot h_f} \right)} \quad \text{ec. 13}$$

donde: C_u : coeficiente de transferencia de calor en la unión panel-tubo. En este caso la resistencia presentada al flujo de calor en este sitio es nula, ya que la aleta y el tubo forman un solo cuerpo.

h_f : coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la pared del tubo.

Este factor se puede considerar como la relación entre los coeficientes de transferencia de calor interno y externo del colector, ya que el denominador de la ec. 13 es precisamente la resistencia total que presenta el colector al paso del calor hasta el fluido.

Factor de eliminación de calor

Existe un gradiente de temperatura a lo largo de los tubos aletados, según se va calentando el agua a su paso por ellos, desde la temperatura

ra de entrada T_e hasta la temperatura de salida T_s . La temperatura del --
 agua T_f en cualquier punto 'y' a lo largo de los tubos puede ser calculada--
 por medio de la siguiente ecuación, referida a la temperatura de entrada^{11/}:

$$\frac{T_f - T_a - S/U_p}{T_e - T_a - S/U_p} = \text{EXP}(-U_p \cdot W \cdot F \cdot y / G \cdot C_p) \quad \text{ec. 14}$$

donde: S : radiación incidente sobre el panel
 G : gasto másico del agua por tubo
 C_p : capacidad calorífica del fluido

Para simplificar los cálculos de Q_u se considerará que el panel -
 se encuentra a una sola temperatura y por practicidad se tomará como la tem-
 peratura de entrada del agua T_e , ya que generalmente ésta se conoce.

Sin embargo, debe considerarse que a mayor temperatura del panel-
 se incrementan las pérdidas de calor y la ganancia de calor útil disminuye.
 Si aumenta el gasto másico de agua que pasa por el colector, disminuye la -
 diferencia en las temperaturas del agua de entrada y salida. Esto implica-
 que el panel está siendo mejor refrigerado y que se encuentra en general a-
 una temperatura más baja, con lo que disminuyen las pérdidas de calor y au-
 menta la ganancia de calor útil.

De cualquier manera, existe un mayor o menor gradiente de tempera-
 tura a lo largo de los tubos, por lo que se definió un factor de elimina- -
 ción de calor F_R que relaciona la energía útil real proporcionada por el co-
 lector con la energía útil proporcionada por el mismo considerando que toda
 la superficie del panel se encuentra a la temperatura T_e . Dicho factor es:

$$F_R = \frac{\bar{G} \cdot C_p (T_s - T_e)}{S - U_p (T_e - T_a)} \quad \text{ec. 15}$$

y sustituyendo y transformando:

$$F_R = \frac{\bar{G} \cdot C_p}{U_p} (1 - \text{EXP} (-U_p F' / \bar{G} \cdot C_p)) \quad \text{ec. 16}$$

donde: \bar{G} : gasto másico de agua por tubo y por unidad de área.

$$\bar{G} = G/W \cdot L \quad \text{ec. 17}$$

$$A_c = W \cdot L \cdot n \quad n: \text{número de tubos} \quad \text{ec. 18}$$

$$A_c = \text{área de una unidad colectora}$$

Calor Util Q_u y Eficiencia Real

El numerador de la ecuación 15 es el calor ganado por el agua que pasa a través del colector, o sea, el calor útil Q_u . Despejando de dicha ecuación y sustituyendo nos queda que:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot (S - U_p (T_e - T_a)) \quad \text{ec. 19}$$

Esta expresión es equivalente a la ecuación 5 de balance general de energía, únicamente que el término de calor acumulado ha sido considerado en el factor de eficiencia del colector.

La eficiencia real del colector para cada hora de operación puede ser calculada de la ecuación:

$$\eta \text{ hora} = Q_u / A_c \cdot S \quad \text{ec. 20}$$

La eficiencia real diaria no es la eficiencia horaria promedio, -

sino que debe ser calculada de la siguiente manera:

$$\eta \text{ día} = Q / A_c \cdot S \quad \text{ec. 21}$$

De la ecuación 19 puede verse que existe, para un determinado diseño del colector, con cierta inclinación y cierta diferencia entre la temperatura de entrada al colector y la temperatura ambiente, un valor de radiación solar para el cual la energía absorbida y la pérdida de calor son iguales. Este valor crítico de mínima radiación solar requerida está dado por:

$$S_c = U_p (T_e - T_a) \quad \text{ec. 22}$$

La ganancia de calor útil puede ser expresado entonces en términos de S_c , cuando $S - S_c$ es positivo, de la siguiente manera:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot (S - S_c) \quad \text{ec. 23}$$

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR

El objetivo de analizar numéricamente el funcionamiento del colector es llegar a conocer la eficiencia real con la que pueda estar operando en cierto momento y el calor útil que suministra a lo largo del año para poder definir un sistema dentro del cual opere el colector en coordinación -- con el calentador complementario de combustible y un posible tanque aislado de almacenamiento.

Selección de las Variables de Diseño

Para atacar el problema fue necesario definir de las variables in

volucradas dentro del juego de ecuaciones presentado en el capítulo anterior los posibles parámetros, las variables de diseño y las variables calculables.

Algunos parámetros fueron determinados por los materiales de construcción que se usarán y que fueron escogidos por razones previamente expuestas. Entre estos parámetros figuran:

k_{ais} : conductividad térmica del aislante

k_p : conductividad térmica del panel

ϵ_g : emisividad del vidrio

ϵ_p : emisividad del panel

Otros parámetros fueron determinados por condiciones climatológicas y de radiación, como son:

S : radiación insidente sobre el panel

T_a : temperatura ambiente

v : velocidad del viento

Por medio del algoritmo de selección de alternativas de Christensen y Rudd ^{12/}, se definieron como variables de diseño las siguientes:

W : distancia entre tubos

D : diámetro de los tubos

L : longitud total de los tubos

N : número de cubiertas

G : gasto de agua que se pasará a través del colector

T_e : temperatura de entrada del agua

U_p : coeficiente total de pérdidas de calor

Dado el alto número de variables de diseño se analizará la variación de cada una de ellas independientemente o en grupos, manteniendo el resto constante y variando el valor de otra de ellas dentro de un rango práctico a este trabajo. También se analizará la influencia que ejercen estas variables sobre la eficiencia del colector.

Ya que este análisis representa un gran número de cálculos y debido a que parte de ellos se realizaron en computadora, se presentan los resultados en forma tabulada para mayor claridad.

Análisis del Coeficiente Total de Pérdidas de Calor U_p

El coeficiente total de pérdidas de calor se analizará haciéndolo separadamente con sus dos componentes U_s y U_f .

U_s depende tanto de variaciones en las condiciones ambientales como variaciones en el diseño. En las siguientes tablas se muestra su variación con respecto a otra variable, manteniendo el resto constante, como se indica en cada caso. Los valores que se tomaron para las otras variables fueron promedios tanto para la temperatura ambiente como para la velocidad del viento. Se tomó la mayor temperatura de placa esperada, ya que de este modo se mantiene el valor de U_p en el límite superior. Otras variables que aparecen en la ecuación 9 son:

ϵ_p : emisividad del panel con una capa de pintura negro-mate

0.95

Tabla 1.2.1.2.d. Variación de U_s con respecto a T_a

T_a (°C)	U_s (Btu/hft ² °F)		para:
	$T_p = 30$ °C	$T_p = 65$ °C	
5	0.51	0.61	$v = 2$ m/s
10	0.51	0.61	$N = 2$
15	0.50	0.61	$Ep = 0.95$
20	0.49	0.62	$Eg = 0.88$
25	0.47	0.62	
30	0.46	0.62	

Tabla 1.2.1.2.e. Variación de U_s con respecto a v .

v (m/s)	U_s (Btu/hft ² °F)	para:
0	0.56	$T_a = 20$ °C
1	0.59	$T_p = 65$ °C
2	0.62	$N = 2$
3	0.64	
5	0.67	
7	0.70	
10	0.71	

Tabla 1.2.1.2.f. Variación de U_s con respecto a N

N	U_s (Btu/hft ² °F)	Para:
0	9.18	$T_a = 20$ °C
1	1.32	$T_p = 65$ °C
2	0.62	$v = 2$ m/s
3	0.45	

Tabla 1.2.1.2.g. Variación de U_s con respecto a T_p

T_p (°C)	U_s (Btu/hft ² °F)		Para:
	v (m/s)	N	
21	0.40	0.42	$T_a = 20$ °C
30	0.47	0.51	$N = 2$
40	0.51	0.56	
50	0.55	0.59	
60	0.59	0.62	
70	0.64	0.69	
80	0.70	0.79	

ϵ_g : emisividad del vidrio 0.88

De la tabla 1.2.1.2.d. se puede apreciar que la temperatura ambiente tiene poca influencia sobre el valor de U_s cuando el colector trabaja a 65°C. Cuando trabaja a una temperatura menor como es 30°C, el valor de U_s decrece cuando aumenta la temperatura ambiente. Por lo tanto se puede usar un valor de temperatura ambiente medio único sin temor a depreciar el valor de U_s .

La variación de U_s con respecto a la temperatura del panel es ligeramente más notoria. El rango de variación de la temperatura del panel es grande y depende tanto de la temperatura de entrada del agua como de las condiciones de radiación incidente sobre el panel. Este caso se analizará más adelante, aunque se puede recomendar el uso de dos valores únicos de U_s intercalados apropiadamente en el rango de variación de T_p . De la tabla 1.2.1.2.g. se puede observar que el valor de U_s aumenta con la temperatura T_p , aunque el crecimiento es mucho más marcado en el límite superior, y se puede esperar que el valor de U_s aumente desproporcionalmente con la temperatura en un rango mayor de la misma, dada la tendencia en los últimos valores.

De mayor importancia es la variación de U_s con respecto al viento. Tabla 1.2.1.2.e. Aunque el rango de velocidades de viento en el D.F. no es grande (máx. 3.5m/s) se observarán las condiciones climatológicas de cada mes para el cálculo del valor de U_s correspondiente.

El número de cubiertas si es un factor definitivo si se quiere re

ducir las pérdidas de calor, como se aprecia de la tabla 1.2.1.2.f. Es indispensable el uso de cubiertas, ya que la convección forzada directa sobre el panel produce grandes pérdidas de calor. El número de cubiertas que se use es función del costo final del colector y de la mejora que cada una de ellas presenta en la operación del colector. El uso de tres cubiertas eleva el costo del colector y no reduce apreciablemente el valor de U_s . Se usarán dos cubiertas, ya que si se reduce apreciablemente el valor de U_s en relación del que se tiene para una cubierta.

El valor del coeficiente U_f depende principalmente del espesor del aislante que se coloca directamente debajo del panel colector. El cajón de plástico sirve a su vez de aislante, pero su espesor está suscrito por las otras funciones que desempeña a 5mm. El valor del coeficiente U_f como resultado de la suma de estas dos resistencias y en función de la primera es:

Tabla 1.2.1.2.b. U_f en función de L_{ais}

L_{ais} (plg)	1	2	3
U_f (Btu/hft ² °F)	0.31	0.16	0.11

El valor de U_f para dos pulgadas de espesor del aislante es adecuado en relación con el valor de U_s .

Como conclusión al análisis hecho a la variación de U_s y U_f con respecto a las diferentes variables, se presenta la siguiente tabla con los valores del coeficiente total de pérdidas de calor U_p para cada mes y para dos diferentes temperaturas del panel. Se tomó una temperatura ambiente --

promedio de 20°C para todos los meses y en cada uno la correspondiente velocidad máxima del viento.

Tabla 1.2.1.2.i. U_p (Btu/hft²°F)

MES	E	F	M	A	M	J
T_p (°C)						
30	0.66	0.67	0.67	0.68	0.67	0.66
65	0.78	0.80	0.80	0.81	0.80	0.78

MES	J	A	S	O	N	D
T_p (°C)						
30	0.66	0.65	0.65	0.65	0.66	0.67
65	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.80

Análisis de la Caída de Presión en los Tubos en Función del Gasto Másico de Agua y del -- Diámetro de la Tubería, así como su Influencia sobre el Coeficiente de Transferencia de Calor h_f .

Para calcular la caída de presión se usó la fórmula de Darcy:

$$\Delta p = 0.001294 \frac{f \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}{d} \quad (\text{psi}) \quad \text{ec. 24}$$

donde: f : factor de fricción en los tubos Gráfica A-24
 L : longitud de los tubos (ft) Crane (13)

ρ : densidad del agua a la temperatura de operación

v : velocidad del agua (ft/s)

d : diámetro de los tubos (plg)

Otras fórmulas y datos utilizados:

$$G = 19.635 \rho \cdot v \cdot d^2 \quad \text{ec. 25}$$

donde: G : gasto másico (lb/h)

$$Re = 300 \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad \text{ec. 26}$$

donde: μ : viscosidad del agua a la temperatura de operación.

El coeficiente de transferencia de calor h_f se encuentra graficado en función de la velocidad del agua y su temperatura en la Fig. 25 del apéndice del Kern 14/.

Datos: $\rho_{\text{agua}}^{140^\circ F} = 61.376 \text{ lb/ft}^3$

$$\mu_{\text{agua}}^{140^\circ F} = 0.5 \text{ c.p.} = 1.21 \text{ lb/hft}$$

Los resultados presentados en la tabla 1.2.1.2.j. están referidos a una unidad calefactora, o sea, un tubo aletado de 2m de largo con su respectivo codo de conexión, cuya longitud equivalente en diámetros de tubería es:

$$L/D = 60$$

Tabla A-30

Crane

La eficiencia del colector aumenta con el gasto másico de agua que pasa por el mismo, lo mismo que el coeficiente de transferencia de calor h_f .

	D(plg)	1/2	3/4	1
v(ft/s)	L_{eq} (ft)	9.00	10.34	11.56
1.00	G(lb/h)	301	678	1205
	Re	7609	11413	15217
	f'	0.038	0.034	0.031
	Δp (lb/plg ²)	0.054	0.037	0.028
	h_f (Btu/hft ² °F)	416	400	364
1.5	G	452	1017	1808
	Re	11413	17119	22826
	f'	0.036	0.031	0.029
	Δp	0.116	0.076	0.056
	h_f	582	560	507
2.0	G	602	1356	2410
	Re	15217	22826	30434
	f'	0.034	0.031	0.028
	Δp	0.194	0.135	0.103
	h_f	728	700	637
2.5	G	753	1695	3012
	Re	19022	28532	38043
	f'	0.033	0.029	0.027
	Δp	0.295	0.189	0.155
	h_f	840	814	764

Tabla 1.2.1.2.j.

Al aumentar el Re , aumenta la turbulencia del fluido dentro de los tubos y se mejora la transferencia de calor al agua. Por ello, los tubos aletados permanecen a una temperatura más baja al ser mejor refrigerados.

Una velocidad de 2 ft/s nos proporciona un rango adecuado para el valor del No. de Reynolds Re en cualquiera de los tres diámetros de tubería, aunque el coeficiente de transferencia de calor h_f es mejor en el tubo de media pulgada.

La caída de presión que se tiene en este tubo en tales condiciones es adecuada, ya que en un panel colector de 6 tubos conectados en serie se tendría una caída de presión de aproximadamente 1 psi, lo que ocasionaría una caída de presión de aproximadamente 10 psi para un sistema de 10 colectores en serie. Una caída de presión de 10 psi es adecuada para un sistema así. El gasto másico correspondiente es de 602 lb/h y el coeficiente de transferencia de calor h_f es de 728 Btu/hft²°F.

Análisis de los Factores de Eficiencia

El objetivo de esta sección es analizar en qué grado influyen las variables de diseño W y t_p la eficiencia general del colector. Se presentan los valores que toman los diferentes factores de eficiencia presentados en el capítulo anterior, variando los valores de ambas variables de diseño dentro de los rangos prácticos para este trabajo.

Eficiencia de una Aleta

El rango de variación de ambas variables de diseño que se analizan en esta sección es:

Distancia entre Tubos W : 5,10,15,20 cm (aprox. 2,4,6,8, plg)

Espesor de las Aletas t_p : 0.5,1,2,3 mm (0.02,0.04,0.08,0.12 plg)

para: Diámetro de los Tubos D : 0.5 plg

Coef. Total de Pérdidas de Calor U_p : 0.78 Btu/hft²°F

Cond. Térmica de Aluminio k_{Al} : 118 Btu/hft°°F

Los valores calculados con las ecuaciones 11 y 12 se presentan en las tablas 1.2.1.2.k. y 1.2.1.2.l. respectivamente.

Como se puede ver, la mayor eficiencia de la aleta se tiene para la menor distancia entre tubos y el mayor espesor de la misma. Esto se traduciría en tener una aleta sumamente pequeña y gruesa para alcanzar una eficiencia mayor. Esto implicaría un gran número de tubos por colector y un alto costo del mismo, ya que el precio unitario del tubo aletado es aproximadamente igual siendo la aleta pequeña o grande, debido al proceso de fabricación de los mismos.

Indiscutiblemente se recomienda usar un grosor de aleta de 3 mm, y una distancia entre tubos que resulte en un costo del colector moderado, como sería 4,6 u 8 plg. Esta última se puede descartar por la gran baja que sufre la eficiencia en ese caso.

Tabla 1.2.1.2.k.

t_p (mm)	t_p (plg)	$k_{Al} \cdot t_p$	$m^2 = U_p / k_{Al} t_p$	m (1/ft)
0.5	0.02	0.20	3.90	1.97
1	0.04	0.39	2.00	1.41
2	0.08	0.79	0.99	0.99
3	0.12	1.18	0.66	0.81

Tabla 1.2.1.2.1. Eficiencia de una Aleta (F)

t_p (mm)	0.5	1	2	3
w (plg)				
2	0.9950	0.9974	0.9987	0.9991
4	0.9734	0.9861	0.9931	0.9954
6	0.9372	0.9666	0.9832	0.9887
8	0.8903	0.9399	0.9693	0.9792

Tabla 1.2.1.2.m. Factor de Eficiencia F'

t_p (mm)	0.5	1	2	3
w (plg)				
2	0.9949	0.9967	0.9977	0.9980
4	0.9742	0.9852	0.9913	0.9933
6	0.9388	0.9656	0.9807	0.9857
8	0.8928	0.9389	0.9661	0.9753

Tabla 1.2.1.2.n. Factor de Eliminación de Calor F_R

t_p (mm)	0.5	1	2	3
w (plg)				
2	0.9945	0.9963	0.9973	0.9976
4	0.9738	0.9848	0.9909	0.9929
6	0.9384	0.9652	0.9803	0.9853
8	0.8925	0.9385	0.9657	0.9749

Factor de Eficiencia del Colector (F')

Siendo este factor función de la distancia entre tubos y de la eficiencia de aleta, se presentará su variación con respecto a las dos variables de diseño que se analizan en esta sección, W y t_p , usándose los valores correspondientes de F de la tabla 1.2.1.2.1.

El valor del factor F' se calculó con la ecuación 13, usándose los valores de las variables ya presentados y además:

$$\text{Coef. de Transferencia de Calor } h_f: 728 \text{ Btu/hft}^2\text{°F}$$

Factor de Eliminación de Calor (F_R)

Este factor es función tanto del factor de eficiencia F' como del gasto másico por unidad de área \bar{G} . Este último depende tanto del gasto másico G como del área unitaria que se considere. La influencia que tienen estas dos últimas variables sobre la eficiencia general del colector y sobre la ganancia de calor útil se analizarán en la siguiente sección.

Para analizar la variación de F_R dentro de los objetivos de esta sección se considerará el área de un tubo aletado individual como área unitaria.

En la tabla 1.2.1.2.n. se presenta el factor F_R como función de las variables W y t_p , ya que su valor depende de las mismas a través del factor de eficiencia del colector F' .

Los valores de las variables que aparecen en la ecuación 16 son:

Gasto Másico por Unidad de Area \bar{G} : 183 lb/hft²

Capacidad Calorífica del agua C_p : 1.00 Btu/lb°F

Tanto el factor de eficiencia del colector como el factor de eliminación de calor presentan la misma tendencia que la eficiencia de la aleta con respecto a las variables de diseño W y t_p .

En general se puede decir que el colector presentará una mayor eficiencia para un mayor espesor de la aleta y un menor distanciamiento entre tubos.

Q_u y T_s en función de \bar{G} y W .

En esta sección se analiza la ganancia de calor útil Q_u y la temperatura de salida del agua T_s en función del gasto másico por unidad de área \bar{G} y del espaciado entre tubos W . Tanto Q_u como T_s son función del nivel de radiación solar incidente sobre el panel y la temperatura de salida del agua es a su vez función de la temperatura de entrada de la misma.

La influencia que ejerce \bar{G} sobre las dos variables por analizar se debe al gasto másico G y al área considerada como unitaria. Esta varía según sea la conexión entre tubos y paneles, en serie o en paralelo.

El área de un tubo aletado individual es el producto $W \cdot L$, donde W es el ancho de ambas aletas más el tubo y L es el largo del tubo. El agua que pasa por ese tubo recibe el calor útil absorbido por el mismo y sus ale

tas. Si los tubos están conectados en serie, el mismo gasto de agua recibe el calor absorbido por el número de tubos aletados conectados. Por lo tanto, debe considerarse el área total correspondiente al número de tubos aletados conectados en serie como área unitaria. Esto se manifiesta a través del factor L, ya que W es igual para todos los tubos aletados en un diseño dado.

La variación de W afecta los factores de eficiencia, como se observó en la sección anterior.

En el caso de conexión en paralelo, el gasto total que circula por el panel es la suma de los gastos que pasan a través de las unidades colectoras o tubos aletados individuales y el área que se debe considerar es únicamente la de uno.

La temperatura más alta de salida se alcanza cuando el agua permanece más tiempo en los paneles, o sea, cuando recorre una distancia mayor a través de los mismos a una velocidad menor. La velocidad del agua es función del gasto para un diámetro de tubería dado. Sin embargo, como se veía anteriormente, un gasto pequeño ocasiona una baja en la eficiencia de transferencia de calor al fluido.

Los valores de las tablas 1.2.1.2.p. se calcularon con las ecuaciones 11 a 23, usándose valores promedio para el coeficiente de pérdidas de calor U_p de la tabla 1.2.1.2.i. para temperaturas de entrada del agua de 20 y 40°C, correspondientes a temperaturas en el panel de 30 y 65°C aproximadamente. Las temperaturas ambientales respectivas se tomaron como 18 y -

20°C. Para hacer más notoria la diferencia en los valores calculados en función del gasto másico y del espaciamiento entre tubos, se tomaron valores extremos para cada una de las variables en consideración, siendo dichos valores 300 y 600 lb/h y 2 y 6 plg. respectivamente. El espesor de la aleta se tomó de 3 mm.

Se consideran cuatro valores diferentes de radiación solar de la tabla 1.2.1.2.c. Se tomaron los valores máximo y mínimo en el año y dos valores intermedios más.

Se hace el análisis de la ganancia de calor útil por unidad de área q_u para un colector solar plano, considerando conexión de los tubos en paralelo y en serie. El área de un colector individual es de 21.52 ft². Se calculó también el calor ganado por un sistema de diez colectores, dado por unidad de área, con área total de 215 ft².

La longitud L que recorre el gasto de agua G en cada caso es:

para W = 2 plg	1 colector con tubos en:	Sistema
	paralelo : L = 6.56 ft	1A
	serie : L = 131.2 ft	2A
	10 colectores en serie con tubos en:	
	paralelo : L = 65.6 ft	3A
	serie : L = 1312 ft	4A
W = 6 plg	1 colector con tubos en:	
	paralelo : L = 6.56 ft	1B
	serie : L = 39.4 ft	2B

Tabla 1.2.1.2.p. Calor ganado y temperatura de salida del agua en función del gasto másico de agua, espaciamiento entre tubos, temperatura de entrada del agua y radiación incidente para cuatro sistemas colectores .

Nomenclatura:

T_e : temperatura de entrada del agua ($^{\circ}\text{C}$)

T_s : temperatura de salida del agua ($^{\circ}\text{C}$)

G : gasto másico de agua (lb/h)

q_u : calor ganado (Btu/hft^2)

Radiación incidente : $46.5 \text{ Btu/h}\cdot\text{ft}^2$

Sistema		1A		2A		3A		4A	
G	T_e	20	40	20	40	20	40	20	40
300	T_s	20.0	40.0	20.4	40.1	20.2	40.1	23.4	41.4
	q_u	44.0	18.4	43.8	18.3	44.0	18.3	42.0	17.4
600	T_s	20.0	40.0	20.3	40.1	20.1	40.0	21.8	40.7
	q_u	44.0	18.4	44.0	18.3	44.0	18.4	43.0	17.9
Sistema		1B		2B		3B		4B	
G	T_e	20	40	20	40	20	40	20	40
300	T_s	20.1	40.0	20.3	40.1	20.5	40.2	23.1	41.3
	q_u	43.4	18.1	43.3	18.1	43.2	18.0	41.6	17.3
600	T_s	20.0	40.0	20.3	40.1	20.3	40.1	21.6	40.7
	q_u	43.5	18.2	43.3	18.1	43.3	18.1	42.5	17.7

Tabla 1.2.1.2.p. (continuación)

Radiación incidente: 136 Btu/hft²

Sistema		1A		2A		3A		4A		1B		2B		3B		4B	
G	T _e	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
300	T _s	20.1	40.0	21.1	40.9	20.5	40.4	30.2	48.3	20.2	40.1	21.0	40.8	21.6	41.3	29.3	47.5
	q _u	134	108	133	107	133	107	127	102	132	106	131	106	131	106	126	101
600	T _s	20.0	40.0	20.5	40.4	20.3	40.2	25.3	44.3	20.1	40.1	20.5	40.4	20.8	40.7	24.7	43.9
	q _u	134	108	133	107	133	107	130	105	132	106	132	106	131	106	129	104

Radiación incidente: 228 Btu/hft²

300	T _s	20.1	40.1	21.8	41.6	20.9	40.8	37.2	55.4	20.3	40.2	21.6	41.5	22.7	42.4	35.6	53.9
	q _u	225	200	224	199	225	199	215	189	222	197	222	196	221	196	213	188
600	T _s	20.0	40.0	20.9	40.8	20.5	40.4	28.9	47.9	20.1	40.1	20.8	40.7	21.4	41.2	28.0	47.1
	q _u	225	200	225	199	225	200	220	194	222	197	222	197	222	196	218	192

Radiación incidente: 325 Btu/hft²

300	T _s	20.1	40.1	22.6	42.4	21.3	41.2	45.0	62.9	20.4	40.4	22.3	42.2	23.9	43.6	42.4	60.7
	q _u	322	297	321	295	322	296	307	280	318	293	317	291	316	290	305	279
600	T _s	20.1	40.1	21.3	41.2	20.7	40.6	32.8	51.8	20.2	40.2	21.2	41.1	21.9	41.8	31.4	50.6
	q _u	322	297	322	296	322	296	315	288	318	293	317	292	317	292	311	285

10 colectores en serie con tubos en:

paralelo : L = 65.6 ft 3B

serie : L = 393.6 ft 4B

Como se había mencionado anteriormente, el gasto de agua influye sobre la eficiencia que se pueda tener en la transmisión de calor a la misma, situación que se deja ver a través de la cantidad de calor útil ganado. Esto se hace más palpable en el sistema de 10 colectores conectados en serie, como se observa en las tablas 1.2.1.2.p. Es con este sistema con el cual se alcanza una mayor temperatura del agua, y aunque la temperatura de salida del agua es mayor para un gasto menor, éste no se recomienda por la baja de eficiencia que ocasiona.

El uso de un tanque aislado de almacenamiento permitiría elevar la temperatura del agua a los niveles requeridos para uso doméstico (55 a 60°C) por medio de recirculación de la misma. Tratar de elevar la temperatura del agua de 20 a 60°C en un solo paso por los paneles requeriría de un gran número de ellos, siendo el objetivo del colector solar captar la energía disponible del sol en la forma más económica posible. En caso de ser requerido es complementado por un calentador común.

El efecto de recircular el agua se reflejaría en el aumento de la temperatura del agua de entrada y todo el panel colector trabajaría también a una temperatura media más elevada, lo que ocasiona una baja en la eficiencia. Esto se manifiesta matemáticamente tanto en el valor del coeficiente U_p como en la diferencia de temperaturas $(T_e - T_a)$ en la ecuación 19. Esta baja en la eficiencia del colector causada por el incremento en la tempera-

tura de entrada del agua se puede apreciar en la tabla 1.2.1.2.p. considerando la cantidad de calor suministrada por el colector solar en cada caso. También se puede apreciar el efecto que tiene la variación del espaciamiento entre tubos sobre la eficiencia del colector.

Calor Total Suministrado y Eficiencia Real del Colector

Basándose en los datos de temperaturas ambientales y de radiación para el D.F. presentados en las tablas 1.2.1.2.a. y 1.2.1.2.b., se calculó el calor proporcionado por un sistema de 10 colectores en serie con el diseño establecido. Este sistema tiene un área total de captación de 215 ft².

El cálculo se hizo para un año, con un día representativo de cada mes. Los datos de radiación horaria fueron corregidos por el factor de -- transmitancia del vidrio, con el fin de considerar la radiación real incidente sobre el panel. Dado el rango de variación del mismo en función del ángulo de incidencia, se tomó como:

0.84	para las horas solares	7- 8 y 16-17
0.86		8-10 y 14-16
0.88		10-14

Los valores de la tabla 1.2.1.2.q. se calcularon con las ecuaciones 19 a 23.

El valor de S_c (radiación mínima necesaria) se estimó considerando un valor promedio de U_p de 0.78 Btu/hft²°F, que corresponde a una tempe-

ratura del panel de 65°C y un rango de temperatura de entrada del agua de 40 a 55°C. La temperatura ambiente se estimó considerando los datos de temperaturas máxima, mínima y promedio, para cada mes.

A partir de los datos de la tabla 1.2.1.2.q. se calculó la eficiencia real del colector con la ecuación 21 para cada mes. Estos valores se presentan en la tabla 1.2.1.2.r.

La eficiencia real del colector es relativamente alta debido a su diseño. Con una eficiencia máxima de 87.5% y mínima de 72.6% se encuentra por encima de otros tipos de colector de panel hasta ahora publicados, que presentan eficiencias de hasta 60%.

La diferencia radica principalmente en que generalmente se ha despreciado la importancia que tiene la resistencia que se presenta al flujo de calor del panel colector hasta el fluido que lo transporta y las pérdidas de calor al través de la parte superior del colector.

El máximo rendimiento del colector coincide con la época del año en la que se tiene un máximo en la radiación solar en el D.F., principalmente porque las condiciones atmosféricas son favorables. Se trata de la época de secas que abarca generalmente los meses de febrero y marzo.

El mínimo rendimiento se tiene en el mes de julio, que corresponde a la época de lluvias en la cual la nubosidad restringe la insolación. Esta época comienza entre abril y mayo y se continúa hasta mediados de septiembre, acentuándose principalmente en los meses de junio y julio.

Se tiene un máximo secundario en el rendimiento en el mes de octubre. Se trata de una segunda época de secas en el otoño y comienzos del invierno, en la cual desaparecen paulatinamente las nubosidades densas de tipo convectivo 15/.

Se observa que la eficiencia del colector en el mes de enero es relativamente baja a pesar de que la radiación es alta. Esto se debe a que las condiciones ambientales son extremas y temperaturas ambientales bajas producen mayor pérdida de calor hacia los alrededores del colector disminuyendo la ganancia de calor útil.

El área requerida para calentar el agua para uso doméstico es menor al área que presenta el sistema de diez colectores, como se verá en el siguiente capítulo. Un sistema con un número menor de colectores conectados en serie presenta una mayor eficiencia, como se observa de los valores de calor útil en la tabla 1.2.1.2.p.

El propósito de hacer los cálculos para el sistema de diez colectores es el de lograr un margen de seguridad en los valores de calor útil proporcionado por unidad de área.

La diferencia del calor proporcionado por un sistema u otro puede ser considerada calor perdido en tuberías, bomba, cambiador de calor, etc.

Tabla 1.2.1.3.g. Calor proporcionado por un sistema de 10 colectores en serie a lo largo del año.

Mes	Enero			Febrero			Marzo			
	(Ftu/h·ft ²)		(Btu/h)	(Ftu/h·ft ²)		(Btu/h)	(Ftu/h·ft ²)		(Btu/h)	
	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u	
1	8--9	86.7	35.1	10671	88.5	30.9	11912	116.2	29.5	17930
2	9-10	116.2	35.1	16772	166.0	30.9	27940	217.7	29.5	38921
3	10-11	190.0	26.7	33772	217.7	25.3	39790	269.3	25.3	50461
4	11-12	243.5	26.7	44836	289.6	25.3	54659	289.3	22.5	55238
5	12-13	258.2	26.7	47876	300.7	25.3	56955	319.1	22.5	61339
6	13-14	247.2	26.7	45601	291.4	25.3	55031	300.7	25.3	56955
7	14-15	210.3	30.9	37101	258.2	30.9	47007	269.3	29.5	50461
8	15-16	177.1	30.9	30235	247.2	30.9	44732	243.5	29.5	44257
9	16-17	132.8	30.9	21074	191.8	30.9	33275	166.0	29.5	28229
Suma		1662		287938	2051		370801	2191		403791

Tabla 1.2.1.2.g. (continuación)

Mes	Abril			Mayo			Junio		
Hora Solar	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u
1	110.7	28.0	17082	138.8	30.9	22315	121.0	30.9	18633
2	202.9	28.0	36150	192.4	22.5	35137	180.5	25.3	32096
3	250.9	28.0	47814	244.7	22.5	45849	232.7	25.3	42892
4	271.1	19.7	51997	252.3	19.7	47524	232.7	21.1	43160
5	271.1	19.7	51997	246.9	19.7	46987	209.6	21.1	38983
6	230.6	19.7	43616	206.3	19.7	38590	189.4	21.1	34806
7	197.4	28.1	35012	161.9	22.5	28829	145.4	22.5	25417
8	154.6	28.1	26161	132.2	22.5	22687	105.7	23.9	16917
9	91.1	28.1	13029	81.3	22.5	12160	79.3	23.9	11457
Suma	1780		322846	1656		300078	1496		264361

Tabla 1.2.1.2.g. (continuación)

Mes	Julio			Agosto			Septiembre		
	S	S _c	S _u	S	S _c	S _u	S	S _c	S _u
1	70.7	29.5	8520	92.5	28.1	13318	101.1	29.5	14807
2	112.4	29.5	17144	150.1	28.1	25230	163.3	28.1	27960
3	129.9	28.1	21053	184.7	25.3	32965	223.2	28.1	40348
4	129.9	28.1	21053	265.1	22.5	50171	257.0	23.9	48207
5	155.6	23.9	27237	240.2	22.5	46263	236.7	23.9	44009
6	142.0	23.9	24424	211.0	22.5	38983	208.3	23.9	38135
7	105.7	23.9	16917	166.6	25.3	28043	168.4	25.3	29015
8	84.6	28.1	11685	138.8	28.1	22894	121.6	28.1	19336
9	59.5	28.1	6494	95.8	28.1	14000	79.3	28.1	10589
Suma	990		154527	1551		272467	1559		272406

Tabla 1.2.1.2.g. (continuación)

Mes	Octubre			Noviembre			Diciembre		
Hora Solar	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u	S	S _c	Q _u
1	108.4	28.1	16607	115.0	29.5	17682	121.6	30.9	18757
2	169.2	25.3	29760	181.8	26.7	32076	186.0	28.1	32655
3	238.1	25.3	44009	239.4	26.7	43988	242.1	28.1	44257
4	277.3	22.5	52694	298.9	23.9	56872	300.3	25.3	56872
5	277.3	22.5	52694	265.1	23.9	48982	271.9	25.3	50999
6	252.3	22.5	47524	236.7	23.9	44009	240.1	28.1	43843
7	219.4	26.7	39852	195.0	23.9	34806	200.2	28.1	35532
8	178.5	26.7	31393	145.4	26.7	24548	128.9	29.5	20557
9	119.0	26.7	19088	80.6	26.7	11209	110.4	29.5	16731
Suma	1840		333621	1758		315072	1802		320263

Tabla 1.2.1.2.r. Valores teóricos de eficiencia diaria mensual del sistema colector solar.

MES	E	F	M	A	M	J
$\eta_{día}$	80.6	84.0	85.7	84.3	84.3	82.2
MES	J	A	S	O	N	D
$\eta_{día}$	72.6	81.7	81.3	84.7	83.0	82.7

1.2.1.3.- Análisis y Diseño del Sistema de Almacenamiento de la Energía Térmica Solar.

Para establecer el area requerida en el sistema de colectores solares para suministrar el calor necesario en una casa con consumo energético moderado, se estimaron los siguientes valores, que se encuentran en el extremo superior de los requerimientos en una casa convencional:

- Cantidad de agua de servicio a 50°C requerida en un día: 1100 lt.
- Carga respectiva de calor: 130944 Btu.

Debido a que el calentamiento de agua por la radiación solar es lento y es principalmente efectivo al medio día, se hace indispensable un depósito aislado de agua caliente que asegure su disponibilidad en las mañanas. El agua gastada durante el día será repuesta en la noche con agua fría. El contenido de agua del depósito debe ser tal, que asegure una temperatura de mezcla adecuada para uso en la mañana.

El volumen mínimo necesario del tanque aislado de almacenamiento se determinó estableciendo los siguientes requisitos al sistema:

- La temperatura del agua en el tanque de almacenamiento deberá ser de 50°C en la madrugada.
- Los 1100 lt de agua usados en el día se restablecen en la noche con agua a 20°C.
- El sistema colector solar aumenta 10°C la temperatura del agua conte-

nida en el tanque de almacenamiento durante el día.

- Las pérdidas de calor diarias en el tanque de almacenamiento causan un descenso de 2°C en la temperatura del agua.

De un balance de materia y energía en el depósito tenemos que:

$$m_1 = m_2 (T_3 - T_2) / (T_1 - T_2)$$

donde: T_1 : temperatura del agua antes de reponer el agua gastada en el día (58°C)

T_2 : temperatura de entrada del agua de alimentación (20°C)

T_3 : temperatura final de la mezcla (50°C)

m_1 : masa de agua requerida en el tanque.

m_2 : masa de agua de repuesto 1100 kg (1100 lt)

por lo tanto:

$$m_1 = 1100(50-20)/(58-50) = 4125 \text{ kg}$$

El volumen final de la mezcla es:

$$m_3 = m_1 - m_2 = 4125 - 1100 = 5225 \text{ kg (5225 lt)}$$

El volumen mínimo requerido del tanque de almacenamiento es por lo tanto de 5225 lt.

La carga de calor que debe suministrar el colector solar de calor-

diariamente para subir la temperatura del agua en el depósito 10°C es:

$$Q = 4125 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \cdot 3.968 \text{ Btu/kcal} \cdot 10^\circ\text{C} = 163680 \text{ Btu/día}$$

carga que incluye el calor usado diariamente en la casa y las pérdidas en el tanque de almacenamiento.

Las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento son:

$$Q_p = 4125 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \cdot 3.968 \text{ Btu/kcal} \cdot 2^\circ\text{C} = 32736 \text{ Btu/día}$$

El procedimiento para establecer el número de unidades colectoras-necesarias para suministrar la carga de calor requerida se basó en los datos de calor útil de la tabla 1.2.1.2.q. De dicha tabla se calculó el calor suministrado diariamente por una unidad colectora en un día representativo de cada mes del año. Con estos valores se calculó el calor proporcionado por seis unidades colectoras conectadas en serie. Estos valores se presentan -- respectivamente en la columna uno y dos de la tabla 1.2.1.3.a.

En la tercera columna de esta tabla se muestra la diferencia que existe entre el calor suministrado por seis unidades colectoras en serie y la carga de calor requerida por la casa. El signo negativo representa que el calor suministrado por los seis colectores no cubre los requerimientos y será necesario complementarlo con el sistema de calentamiento convencional.

Tabla 1.2.1.3.a. Comparación de Carga Requerida y Calor Proporcionado -
por seis Colectores.

Mes	Btu/día*colector	Btu/día*6colectores	Btu/día
Enero	28794	172764	9084
Febrero	37080	222480	58800
Marzo	40379	242274	78594
Abril	32285	193710	30030
Mayo	30008	180048	16368
Junio	26436	158616	- 5064
Julio	15453	92718	-70962
Agosto	27247	163482	- 198
Septiembre	27241	163446	- 234
Octubre	33362	200172	36492
Noviembre	31507	189042	25362
Diciembre	32026	192156	28476

Ya que el sistema de seis colectores suministra el total y más del calor requerido a lo largo de ocho meses del año y parte en los cuatro meses restantes, se considera que un número de seis unidades colectoras en serie es adecuado.

DISEÑO DEL TANQUE TERMICO.

Después de un análisis de materiales y equipo fabricado comercialmente, consideramos que el tanque térmico sale más económico si se construye en el lugar donde se requiere a base de placas de asbesto encementado prefabricadas disponibles en el mercado.

Existen en el mercado los equipos convencionales para almacenamiento de agua de servicio doméstico como lo son los tinacos y las fosas sépticas que, eventualmente, pueden utilizarse como cisternas; sin embargo la capacidad máxima de los tinacos es de 1 600 lt, tomando en consideración que la capacidad mínima requerida en el sistema es de 5 200 lt aproximadamente, sería necesario colocar varios tinacos interconectados. Este hecho elevaría el costo además dificultaría el calentamiento del agua limitando la convección de la misma.

Dado el hecho de que las fosas sépticas son diseñadas para un diferente servicio se eleva su costo, de por sí alto, al adoptarlas al sistema considerado. Sería necesario acondicionarlas térmicamente para prestar el servicio requerido; la construcción con placas de asbesto permite ajustarse a un diseño óptimo tanto en lo relacionado a capacidad como a aislamiento térmico y adecuado calentamiento del agua de servicio a menor costo.

El tanque irá enterrado, preferiblemente en los sótanos de la casa con fácil acceso a la tapa; esto evita que la parte superior del tanque este expuesta a la intemperie y a condiciones ambientales extremas.

Va soportado por una construcción base con piso y paredes de ladrillo común ajustada a las dimensiones de diseño del tanque. La placa de asbesto exterior va directamente adherida a esta construcción.

El tanque va aislado térmicamente con una estructura especial de espuma de poliestireno que encierra celdas de aire de aproximadamente 1 pulgada cúbica. Su diseño se presenta más adelante. La estructura aislante va

colocada entre la pared exterior del tanque y una pared interna, también de asbesto, de menor espesor que forma el depósito de agua propiamente dicho. - Este tanque interior va soportado por travesaños de asbesto para proteger el material aislante.

Las conexiones de agua y la tubería se encuentran localizadas entre el tanque interior y el externo para mantenerlas aisladas.

Las placas de asbesto encementado sirven a su vez de aislante por su relativamente baja conductividad térmica ($0.43 \text{ Btu/hft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$). Estas placas son totalmente impermeables y las juntas tanto del tanque externo como del interno van selladas por medio de tela de asbesto encementada, que para su aplicación requiere únicamente de ser humedecida. En la Fig. 1.2.1.3.a se muestra un corte transversal a través del depósito térmicamente aislado.

Las dimensiones externas del depósito son:

Longitud 8ft

Ancho 4ft

Altura 8ft

El tanque externo será construido con placa de asbesto de 11.5 mm de espesor. Las paredes del tanque interno tienen un espesor de 4.5 mm.

La capacidad neta del depósito es de 6.24 m^3 . Con esta capacidad proporciona un margen de agua caliente para días nublados.

El peso del tanque exterior es de: 525 kg.

El peso del tanque interior es de: 205 kg.

La estructura aislante va colocada en los espacios libres entre ambos tanques y consta de dos placas de espuma de poliestireno de media pulgada de espesor, separadas una pulgada por una estructura cuadrículada del mismo material. Esta estructura forma celdas de aproximadamente una pulgada cúbica. El diseño de esta estructura se muestra en la Fig. 1.2.1.3.b.

Este aislamiento resulta muy eficiente para impedir pérdidas de calor, ya que aprovecha la baja conductividad térmica del aire prácticamente - estático dentro de las celdas y requiere de menos material de construcción - ($k_{\text{aire}} = 0.014 \text{ Btu/hft } ^\circ\text{F}$).

El coeficiente de pérdida de calor del depósito esta constituido - por cuatro resistencias en serie:

1.- pared interna de asbesto:

$$U_1 = \frac{0.43 \text{ Btu/hft}^2 (^\circ\text{F/ft})}{0.015 \text{ ft}} = 29.125 \text{ Btu/hft}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

2.- espuma de poliestireno:

$$U_2 = \frac{0.27 \text{ Btu/hft}^2 (^\circ\text{F/ft})}{0.083 \text{ ft}} = 0.325 \text{ Btu/hft}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

3.- aire:

$$U_3 = \frac{0.014 \text{ Btu/hft}^2 (^\circ\text{F/ft})}{0.083 \text{ ft}} = 0.169 \text{ Btu/hft}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

4.- pared externa de asbesto:

$$U_4 = \frac{0.43 \text{ Btu/hft}^2 (^\circ\text{F/ft})}{0.038 \text{ ft}} = 11.316 \text{ Btu/hfr}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

$$U_t = 1/(1/U_1 + 1/U_2 + 1/U_3 + 1/U_4) = 0.11 \text{ Btu/hft}^2\text{ }^\circ\text{F}.$$

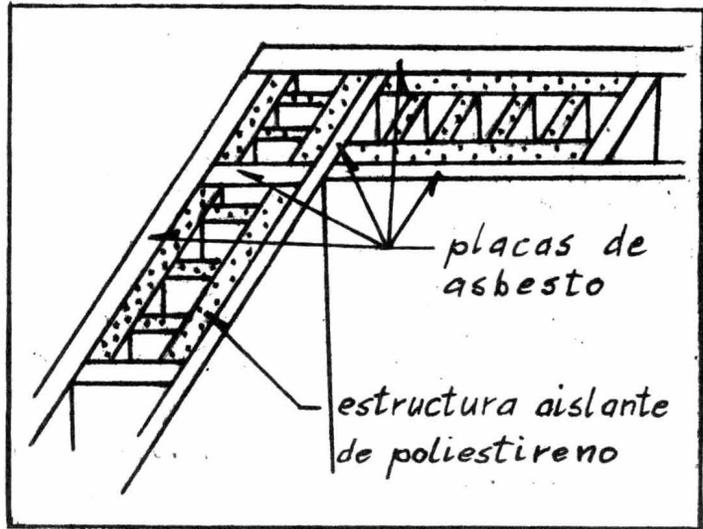


Fig.1.2.1.3.a. Vista Seccional del Tanque de Almacenamiento

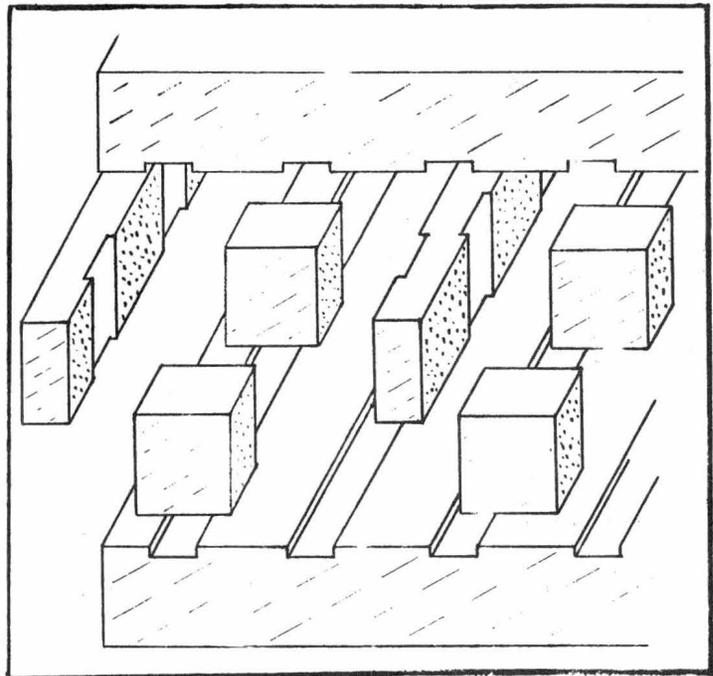


Fig.1.2.1.3.b. Vista Explosiva de la Estructura Aislante de Poliestireno

Las pérdidas de calor en un lapso de 24 horas serían:

$$\begin{aligned} \text{Area exterior del depósito: } & 2 \times 4\text{ft} \times 8\text{ft} = 64 \text{ ft}^2 \\ & 2 \times 8\text{ft} \times 8\text{ft} = 128 \text{ ft}^2 \\ & 1 \times 8\text{ft} \times 4\text{ft} = 32 \text{ ft}^2 \\ & \underline{\hspace{1.5cm}} \\ & 224 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \cdot \Delta t = 0.11 \cdot 224 \cdot 54 \cdot 24 = 31934 \text{ Btu/día}$$

La temperatura del volumen mínimo necesario de agua desciende en - el mismo lapso de tiempo:

$$\Delta T = \frac{Q}{mC_p} = \frac{31939 \text{ Btu} \times 0.252 \text{ kcal/Btu}}{5225 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}} = 1.54^\circ\text{C}$$

DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Debido a que el agua debe ser tratada para prevenir corrosión en - los colectores, se requiere de un circuito cerrado calefactor que transporte la energía de los colectores al tanque de almacenamiento. La energía térmica absorbida por este sistema es cedida al agua de uso por medio de un intercambiador de calor localizado dentro del tanque aislado de almacenamiento. - El agua de este tanque podrá ser usada directamente cuando se encuentre a la temperatura requerida y es a su vez susceptible de ser calentada por el calentador convencional cuando no lo esté.

Se considera que un intercambiador tubular de cobre resulta adecuado para transferir el calor suministrado por los colectores solares al agua de servicio. El calentamiento en el depósito se lleva a cabo por convección natural, ya que se dispone de suficiente tiempo para llevarlo a cabo de esta manera. Se requiere que las dimensiones y la posición dentro del tanque del

intercambiador permita la libre circulación del agua en la parte inferior y a los lados. Ya que el agua caliente sube, la entrada del serpentín deberá estar situada por encima de la salida, de tal modo que el agua que sube por convección tenga contacto con los tubos de mayor temperatura. De esta manera se logra tener un gradiente de temperatura aproximadamente constante y se logra un calentamiento más eficiente.

El cambiador se diseño de acuerdo al método presentado en la sección de convección natural del Kern 16/.

Se establecieron las siguientes condiciones para su diseño, considerando que el sistema solar opera en circunstancias favorables:

El agua de transferencia de calor adquiere un aumento de temperatura de 17°C en cada paso por los colectores.

El intercambiador de calor debe disminuir en 17°C la temperatura de dicha agua.

La temperatura en el tanque de almacenamiento deberá ser de 60°C.

La temperatura media del agua de transferencia será:

$$T_m = 69 - 17/2 = 60.5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

La temperatura media del agua de servicio en el depósito se tomó como:

$$T_t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

El gradiente de temperatura para la transferencia de calor es:

$$\Delta T = 60.5 - 50 = 10.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 18.9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

El tubo del serpentín será de 1/2 pulgada de diámetro, la velocidad, del agua de transferencia, es de 2 ft/s, por lo que:

$$h_f = 728 \text{ Btu/hft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \quad \text{Tabla 1.2.1.2.j.}$$

$$T/d = \frac{18.9}{0.5} = 37.8$$

$$T_f = \frac{T_m + T_t}{2} = \frac{60.5 + 50}{2} = 55.25 \text{ } ^\circ\text{C} = 99.45 \text{ } ^\circ\text{F}$$

De la Fig. 10.4 (Kern):

$$h_c = 120 \text{ Btu/hft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

De donde:

$$U_d = \frac{120 \times 728}{120 + 728} = 103.02 \approx 103 \text{ Btu/hft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

La carga de calor transferida es:

$$Q = mC_p \Delta T = 600 \text{ lb/h} \cdot 1.00 \text{ Btu/lb } ^\circ\text{F} \cdot 17 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 1.8 \text{ } ^\circ\text{F}/^\circ\text{C} = 18421 \text{ Btu/h}$$

El calor transferido en 9 horas es:

$$Q = 18421 \text{ Btu/h} \cdot 9 \text{ h/día} = 165789 \text{ Btu/día.}$$

El área de transferencia requerida es:

$$A = Q/U_d \Delta T = \frac{18421}{103 \cdot 18.9} = 9.46 \text{ ft}^2$$

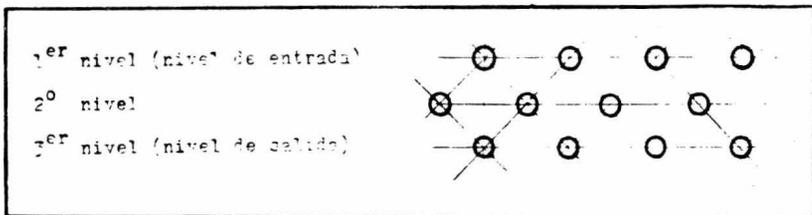
Esta área requiere una longitud total de tubo de 1/2 pulgada de:

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} = \frac{9.46 \text{ ft}^2}{\pi \cdot 0.042 \text{ ft}} = 70.72 \text{ ft}$$

Si se construye el intercambiador a base de tramos de tubería rec-
ta de 6' de largo conectados formando horquillas se requerirán:

$$\text{Número de tubos} = \frac{70.72}{6} = 11.79 \approx 12$$

Estas pueden ser acomodadas a lo largo del depósito de agua en tres
niveles de 4, 4, 4, tubos con arreglo triangular de acuerdo a la siguiente -
figura:



La caída de presión en el intercambiador se calculó con la fórmula-
de Darcy; considerando la longitud equivalente por diámetros de tubería de -
los codos en 180° como :

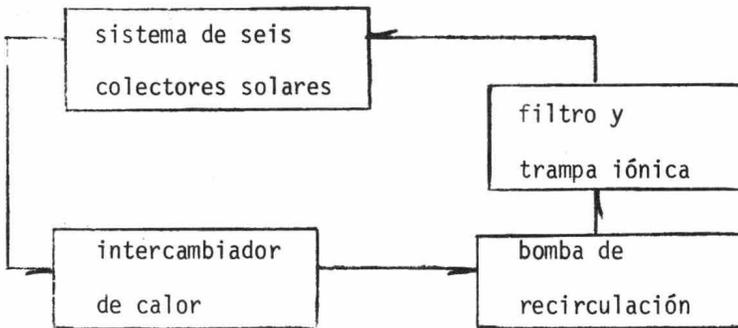
$$L/D = 60$$

$$\Delta p = 0.001294 \cdot \frac{0.034 \cdot (71 + 30) \cdot 61.376 \cdot 2^2}{0.5} = 2.61 \text{ psi}$$

1.2.1.4.- TUBERÍA, FILTRO Y BOMBA DE RECIRCULACION DEL AGUA DE CALENTAMIENTO

Se diseñará en esta sección el resto de los equipos que integran el sistema cerrado de calentamiento, o sea, la tubería, un filtro y trampa iónica y la bomba de recirculación.

Se muestra a continuación el diagrama de flujo del sistema cerrado de calentamiento integrado por los siguientes equipos:



Tubería.

La tubería que se usará en este circuito cerrado será de tubo de cobre de 1/2 pulgada de diámetro. La tubería que une el sistema colector de la radiación solar con el intercambiador de calor localizado en el tanque térmico irá aislada térmicamente para reducir pérdidas de calor en el agua de calentamiento. El aislamiento térmico se hará con lana mineral, usada comunmente para este fin, con una conductividad térmica $k_a = 0.0225 \text{Btu/hft}^2 (\text{°F/ft})$.

La razón de usar tubo de cobre es principalmente para evitar efectos galvánicos que contribuyen a la corrosión en el sistema. Dichos efectos se presentan en sistemas que manejan agua circulando a través de equipos hechos de diferentes metales.

Aislamiento Térmico.

El aislante térmico se diseñará fijando un descenso aproximado permisible en la temperatura del agua de calentamiento en su paso de los colectores al intercambiador de calor de medio grado centígrado, trayecto que se ha considerado para fines de cálculo con una longitud de 15 m.

El espesor del aislante se diseñó de acuerdo al método presentado en el capítulo dos del Kern. 17/.

Suponiendo una temperatura en la superficie del aislante T_1 de 81°F (27°C), una temperatura ambiente diurna T_a de 70°F (20°C) y una temperatura del agua de calentamiento T_s de 158°F (70°C), con espesor del aislante de 1/2 plg., tenemos que:

$$T_1 - T_a = 11^\circ\text{F}$$

el coeficiente de transferencia de calor superficial h_a en base a la Fig. 2.9. es:

$$h_a = 2.25 \text{ Btu/hft}^{20}\text{F}$$

el calor perdido por pie de tubería es:

$$q = \frac{(T_s - T_a)}{(2.3/2 \cdot k_a) \log D_1/D_s - 1/h_a \cdot D_1} = 9.89 \text{ Btu/h (lin.ft)}$$

Comprobación de la temperatura T_1 supuesta inicialmente:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_a \cdot (T_s - T_1)}{2.3 \log D_1/D_s}$$

de donde:

$$T_1 = T_s - \frac{q \cdot 2.3 \log D_1/D_s}{2 \cdot \pi \cdot k_a} = 81.23 \text{ } ^\circ\text{F check}$$

Debido al calor perdido se tiene un descenso en la temperatura del agua de calentamiento de:

$$\Delta T = q \cdot L / G \cdot C_p$$

donde: L : longitud de la sección de tubería (15m)

G : gasto másico de agua (600 lb/h)

C_p : capacidad calorífica del agua (1 Btu/lb $^\circ$ F)

por lo que: $\Delta T = 0.81 \text{ } ^\circ\text{F} = 0.45 \text{ } ^\circ\text{C}$

Este descenso en la temperatura está dentro de los requisitos de - diseño, por lo que un espesor del aislante de 1/2 plg. cumple las especificaciones.

Caida de presión en la tubería.

Considerando que los colectores solares estarán colocados en el techo de la casa y el tanque térmico en los sótanos, se tomará una longitud total de tubería recta de 115 ft (35 m) y una longitud equivalente por accesorios de 50 ft, donde quedan incluidos 12 codos de 90°, 2 válvulas de globo y-

el filtro y trampa iónica, de la siguiente manera:

accesorio	L/D
2 válvulas de globo	340 c/u
12 codos convencionales de 90°	30 c/u
1 filtro y trampa iónica	<u>160</u>
T o t a l	1200

$$\text{longitud equivalente: } 1200 \cdot 1/2(\text{plg}) \cdot 1/12(\text{ft/plg}) = 50\text{ft}$$

La caída de presión se calculará con la fórmula de Darcy:

$$\Delta p = 0.001294(f \cdot L \cdot \rho \cdot v^2) / d$$

usando los datos de la tabla 1.2.1.2.j para una velocidad del agua de 2ft/seg tenemos que:

$$\Delta p = 0.001294(0.034 \cdot 165 \cdot 61.367 \cdot 2^2) / 0.5 = 3.56 \text{ psi}$$

FILTRO Y TRAMPA IONICA.

El filtro y trampa iónica se coloca en el circuito cerrado de calentamiento para proteger los tubos de aluminio de los colectores solares. --- Aunque el agua de calentamiento deberá ser tratada como se indica en la sección de Control de Corrosión de este trabajo para evitar excesiva corrosión en el equipo hecho de aluminio, siempre circulan con el agua partículas relativamente grandes y iones de metales producidos por el desgaste del resto -- de la tubería y equipos por los que circula el agua, por esto es necesario -

este filtro y trampa iónica.

Se trata de una medida de seguridad de diseño muy práctico y sencillo y deberá ir localizado en la corriente antes de los colectores solares.

Dentro de un tramo de 30 cm de manguera de polietileno se sujeta una espiral de alambre delgado de aluminio como se muestra en la figura 1.2.1.3.b. En la sección de entrada de este dispositivo se coloca una malla muy fina que servirá de filtro para las partículas más grandes que pueden dañar la película de óxido protectora en los tubos de aluminio exponiendo el metal y produciendo desgaste excesivo. El alambre de aluminio servirá de elemento de sacrificio, consumiendo los iones metálicos antes de que estos alcancen los tubos de los colectores. El alambre de aluminio puede ser fácilmente sustituido por uno nuevo después de unos seis meses de operación del sistema.

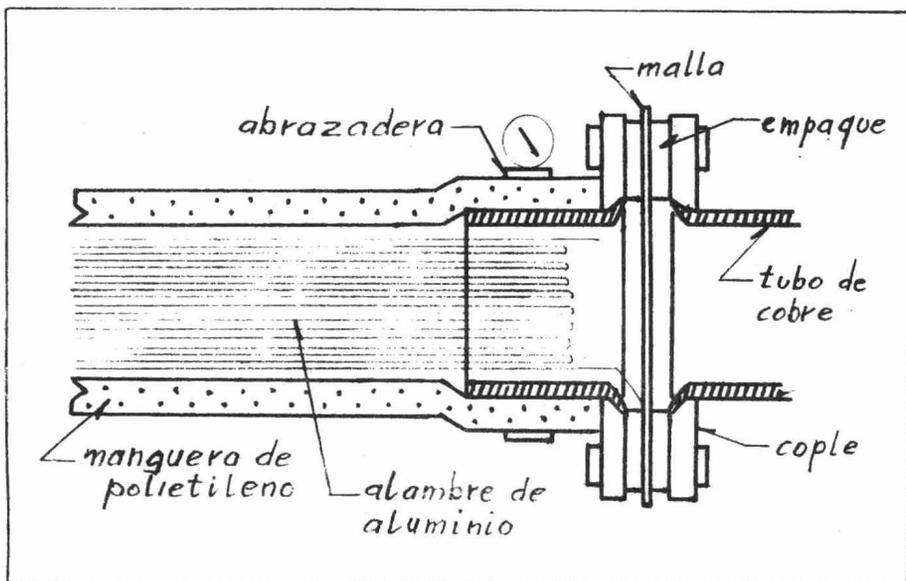


FIG. 1.2.1.3.b. Filtro y Trampa Iónica.

BOMBA DE RECIRCULACION.

La bomba de recirculación deberá impulsar el agua de calentamiento en el circuito cerrado a través de los diferentes equipos, que son en orden-después de la bomba: el filtro y trampa iónica, el sistema de seis colectores solares y el intercambiador de calor.

Ya que se trata de un sistema cerrado, la única resistencia que se presenta al flujo del agua son las fricciones en la tubería y los equipos.

Para conocer la carga de la bomba se partirá de un balance de energía en el circuito cerrado, utilizando la ecuación de Bernoulli:

$$z_1 + 144P_1/\rho_1 + v_1^2/2g = z_2 + 144P_2/\rho_2 + v_2^2/2g + h_L$$

siendo los puntos del sistema donde se hará el balance de energía, uno y dos, la salida y entrada de la bomba respectivamente.

La diferencia de altura entre la entrada y salida de la bomba es--despreciable, por lo que $z_1 = z_2$. La velocidad del agua v es la misma antes y después de la bomba, ya que depende únicamente del diámetro de la tubería, que se mantiene constante a lo largo del circuito. La densidad del agua en los puntos uno y dos es la misma, ya que la temperatura del agua no varía al pasar a través de la bomba y al tratarse de un líquido, es prácticamente incompresible.

Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli se reduce a considerar únicamente la caída de presión a lo largo del circuito debido a fricciones, y que será la energía que debe suministrar la bomba al agua de calentamiento -

para recircularla:

$$144(P_1 - P_2) / f_{\text{agua}} = 144 \cdot \Delta P_T / f_{\text{agua}} = h_L = H$$

La caída de presión total ΔP_T se compone de las caídas de presión en los diferentes equipos del sistema y a lo largo de la tubería, que son:

sistema de seis colectores y tubería de unión	8 psi
intercambiador de calor	3 psi
tubería y accesorios	4 psi
T o t a l	<hr/> 15 psi

por lo que:

$$H = 15(\text{lb}/\text{in}^2)144(\text{in}^2/\text{ft}^2)/61.367(\text{lb}/\text{ft}^3) = 35.2 \text{ ft}$$

la potencia requerida de la bomba, sin considerar la eficiencia de la misma, es:

$$\text{HP} = G \cdot H / 1.98 \cdot 10^6$$

donde: G : gasto másico (600 lb/h)

por lo que:

$$\text{Pot.} : 600(\text{lb}/\text{h})35.2(\text{ft})/1.98 \cdot 10^6(\text{lb} \cdot \text{ft}/\text{h}/\text{PH}) = 0.01 \text{ HP}$$

La potencia requerida en la bomba de recirculación es sumamente pequeña debido al poco gasto que maneja. Instalar una bomba especial que cumpla los requerimientos exactos del sistema resultaría excesivamente costoso, ya que se trataría de un equipo muy especializado.

Es más económico instalar una bomba comercial y hacer los ajustes

necesarios para suplir los requerimientos del sistema.

La bomba más pequeña comercialmente adquirible es de 1/4 de caballo. Para ajustarla al sistema se colocará una placa de orificio en el circuito para provocar una caída de presión adicional. Debe aclararse que dicha bomba trabajará con una eficiencia muy baja, entre 10 y 15%, debido al gasto tan pequeño que maneja, pero aunque se desperdicia potencia, a un nivel tan bajo, la inversión inicial y costos de operación de la bomba comercial resultan inferiores a los costos que se tendrían si se instalara un equipo especial.

Por lo tanto, se instalará una bomba centrífuga convencional de servicio doméstico de 1/4 de caballo. Manejando un gasto de $2.68 \cdot 10^{-3} \text{ ft}^3/\text{s}$ (600 lb/h de agua a 30°C con una densidad de 62.22 lb/ft³) trabajará con una eficiencia del 11%.

El cálculo del diámetro requerido en la placa de orificio para incrementar la carga de la bomba se hará de acuerdo al método presentado en el Crane 18/, en el capítulo 2 páginas 2-14 y 2-15.

La carga que suministra la bomba en las condiciones de operación antes mencionadas es de:

$$H = \frac{HP \cdot \eta \cdot 1.98 \cdot 10^6}{G} = \frac{0.25 \cdot 0.11 \cdot 1.98 \cdot 10^6}{600} = 90.75 \text{ ft}$$

La cabeza requerida por los equipos y tubería del circuito es de 35.2 ft, calculado anteriormente, por lo que la placa de orificio deberá provocar una caída de presión equivalente a:

$$H_{\text{orificio}} = 90.75 - 35.2 = 55.55 \text{ ft}$$

Con una relación de diámetros de orificio y tubería de:

$$d_0/d_1 = \frac{3/32 \text{ plg}}{1/2 \text{ plg}} = 0.188$$

tenemos que el coeficiente de flujo C, leído de la figura correspondiente en la página A-20 con un No. de Reynolds de 15217 (Tabla 1.2.1.2.j.), es:

$$C = 0.935$$

El area del orificio en ft^2 es:

$$A = \pi(d_0)^2/576 = \pi(3/32)^2/576 = 4.79 \cdot 10^{-5} \text{ ft}^2$$

Considerando la ecuación 2-14 y despejando el término de resistencia al flujo h_L del orificio tenemos:

$$q = C \cdot A \sqrt{2g \cdot h_L} \quad \text{Ec. 2-14 (Crane)}$$

$$h_L = (q/C \cdot A)^2 / 2g = (2.68 \cdot 10^{-3} / 0.935 \cdot 4.79 \cdot 10^{-5})^2 / 64.4$$

$$h_L = 55.6 \text{ ft}$$

Por lo tanto, el orificio de 3/32 plg. es adecuado para que el sistema opere con dicha bomba en las condiciones de diseño establecidas.

SISTEMA DE PREPARACION DEL AGUA DE CALENTAMIENTO.

Dado el hecho de que en el circuito cerrado de calentamiento debe circular una mezcla de agua y etilenglicol para evitar corrosión en los equi

pos, se requiere de un sistema para su preparación y que a su vez haga posible el llenado y deaereado del circuito, así como su drenado.

La mezcla de agua y etilenglicol o galato de propilo debe ser controlada a intervalos regulares de tiempo con lo que respecta a su pH, que debe permanecer entre 7 y 8.5. Si llegara a exceder dichos valores, el circuito deberá ser drenado y llenado con mezcla nueva.

Dicho sistema debe permitir el drenado de los colectores solares - en caso de que se interrumpiera la circulación del agua de calentamiento. - En tal caso y con condiciones de radiación solar favorable, el agua en los colectores puede llegar a evaporarse y producir presión interna que puede dañar el equipo.

El sistema requerido se muestra en la siguiente figura:

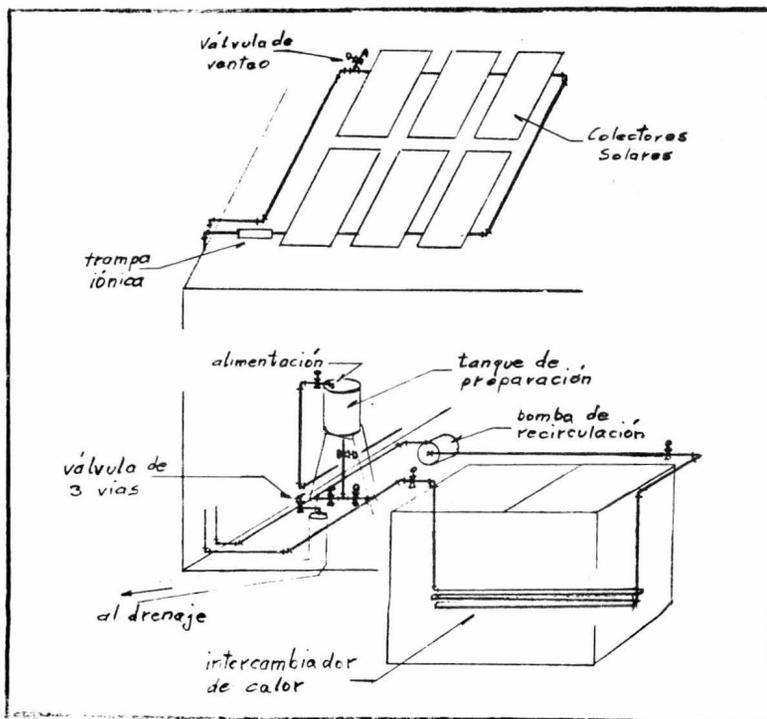


Fig.1.2.1.3.d. Sistema Calefactor Solar Integrado

Dicho sistema consta de los siguientes elementos:

- Tambor de 50 lt para preparación de la mezcla, que es alimentado directamente del agua de servicio urbano. El tambor capta el volúmen total de agua de calentamiento contenida en el circuito cerrado, que son -- aproximadamente 20 lt, y proporciona cierto margen para una reserva y volumen para efectuar la preparación.
- Soporte para el tambor de 50 lt que lo situe a una altura aproximadamente de 1 metro sobre el piso del sótano y que le asegure una posición -- arriba de cualquier equipo del sistema, exceptuando los colectores. -- Este soporte puede ser de fierro o de ladrillo.
- Una válvula de tres vías que permita el drenado del circuito.
- Tres válvulas de glóbo que permiten el drenado de los colectores solares una de ellas trabajando como válvula de ventilación en la parte superior del circuito, para que sea posible el drenado de dicho equipo por gravedad. El agua desalojada de los colectores se capta en el tambor de -- preparación.

1.2.1.5.- SISTEMA DE CONTROL

El rango de variación de la temperatura en los paneles colectores es muy amplio si se consideran las veinticuatro horas del día. En la noche adquieren una temperatura aproximada a la temperatura ambiente nocturna, - que puede llegar en épocas de frío hasta los 0°C en la zona en estudio.

Durante el día y con condiciones favorables de radiación solar - los paneles se pueden calentar hasta aproximadamente unos 200°C, si no son refrigerados apropiadamente circulando agua a través de ellos.

Sin embargo, el rango de variación se delimita si únicamente se - considera el período de operación del sistema calefactor solar, que serían - unas nueve horas diarias, de las nueve de la mañana a las seis de la tarde.

Una vez funcionando el sistema calefactor solar la temperatura de los paneles puede variar, en función de la temperatura de entrada del agua, entre 30 y 80°C.

El agua en el tanque de almacenamiento debe permanecer a una temperatura entre 50 y 60°C, por lo cual se requiere que la circulación del -- agua de calentamiento se interrumpa cuando la temperatura del agua en el -- tanque térmico exceda a la temperatura prevaleciente en los paneles colectores. De no ser así, se tendría un efecto de enfriamiento en el sistema.

La interrupción de la recirculación del agua de calentamiento debe efectuarse automáticamente debido a la inconsistencia de la radiación solar, que en cualquier momento puede dar lugar a la situación antes mencionada al descender la temperatura en los paneles.

Este tipo de control puede llevarse a cabo con dos sensores de temperatura colocados uno en los paneles colectores y uno en el tanque térmico, y un instrumento que detecte la diferencia en las temperaturas medidas y abra o cierre un circuito eléctrico en cierta diferencial establecida de antemano, que controle la bomba de recirculación.

En el tanque de almacenamiento se requieren dos controles de nivel. El control de nivel máximo debe permitir el suministro de agua al tanque para reponer el agua gastada y evitar un sobrellanado del mismo. Este control deberá ser también automático y puede efectuarse con una válvula accionada por un flotador.

El control de nivel mínimo se requiere tanto para proteger la bomba de servicio de la casa como para mantener el intercambiador de calor sumergido y evitar un sobrecalentamiento, además de seguir aprovechando el calor suministrado por los colectores. Para este efecto se usará un interruptor accionado por un flotador localizado dentro del tanque a la altura adecuada y que abra o cierre el circuito eléctrico de la bomba de servicio.

Antes y después del tanque de almacenamiento se colocarán dos válvulas en el circuito cerrado de calentamiento, que deberán permanecer cerra

das durante la noche. De esta manera se evitan pérdidas incesarias de calor causadas al fluir el agua caliente por convección hacia los paneles -- fríos en la parte superior de la casa.

La temperatura mínima requerida del agua de servicio será controlada en última instancia por el termostato del calentador convencional, ya que el agua caliente de servicio circulará del tanque térmico, a través de dicho equipo, a la casa.

INSTRUMENTACION

Se mencionan aquí los instrumentos comerciales disponibles en México que pueden efectuar los diferentes controles requeridos en el sistema calefactor solar.

Para el control de nivel máximo en el tanque de almacenamiento se usará una válvula accionada por un flotador de bola, de uso convencional para depósitos de agua.

El control de nivel mínimo trabaja con un pequeño flotador que acciona un interruptor de bulbo con mercurio. Va localizado en la pared del tanque a la altura determinada como nivel mínimo. El control eléctrico de nivel marca Mercoïd, modelo 40-2R6 puede ser usado para este efecto.

Para controlar la bomba de recirculación se puede usar el modelo L643A de termostatos diferenciales de la marca Honeywell. Este instrumento detecta la diferencia entre dos temperaturas medidas en puntos distantes -

por medio de las dos terminales de un termopar. A cierta diferencial de -- temperatura, que se puede ajustar de 1.5 a 15°C, se acciona un interruptor- de bulbo con mercurio que conecta o desconecta la bomba.

Para conceder una diferencial de temperaturas mínimas de transfe- rencia de calor en el intercambiador de diez grados centígrados, se reco- - mienda establecer dicha diferencial de diez grados como set point en el con- trolador de la bomba de recirculación.

Con una terminal del termopar se medirá la temperatura del agua - caliente de servicio almacenada en el tanque térmico, localizando dicha ter- minal por debajo del nivel mínimo. La segunda terminal de termopar irá fi- ja al panel del penúltimo colector para detectar una temperatura aproximada a la temperatura del agua de salida. Es preferible medir la temperatura - del panel colector a medir la temperatura directamente del agua de salida,- ya que de esta manera se anticipa el efecto de control sobre la bomba de re- circulación.

El instrumento puede ir localizado cerca de la bomba en los sóta- nos de la casa para protegerlo de la intemperie. Los alambres del termopar pueden ser unidos a extensiones de alambre de cobre para alcanzar los pane- les colectores en la parte superior de la casa, cerciorándose de que las ex- tensiones sean de la misma longitud.

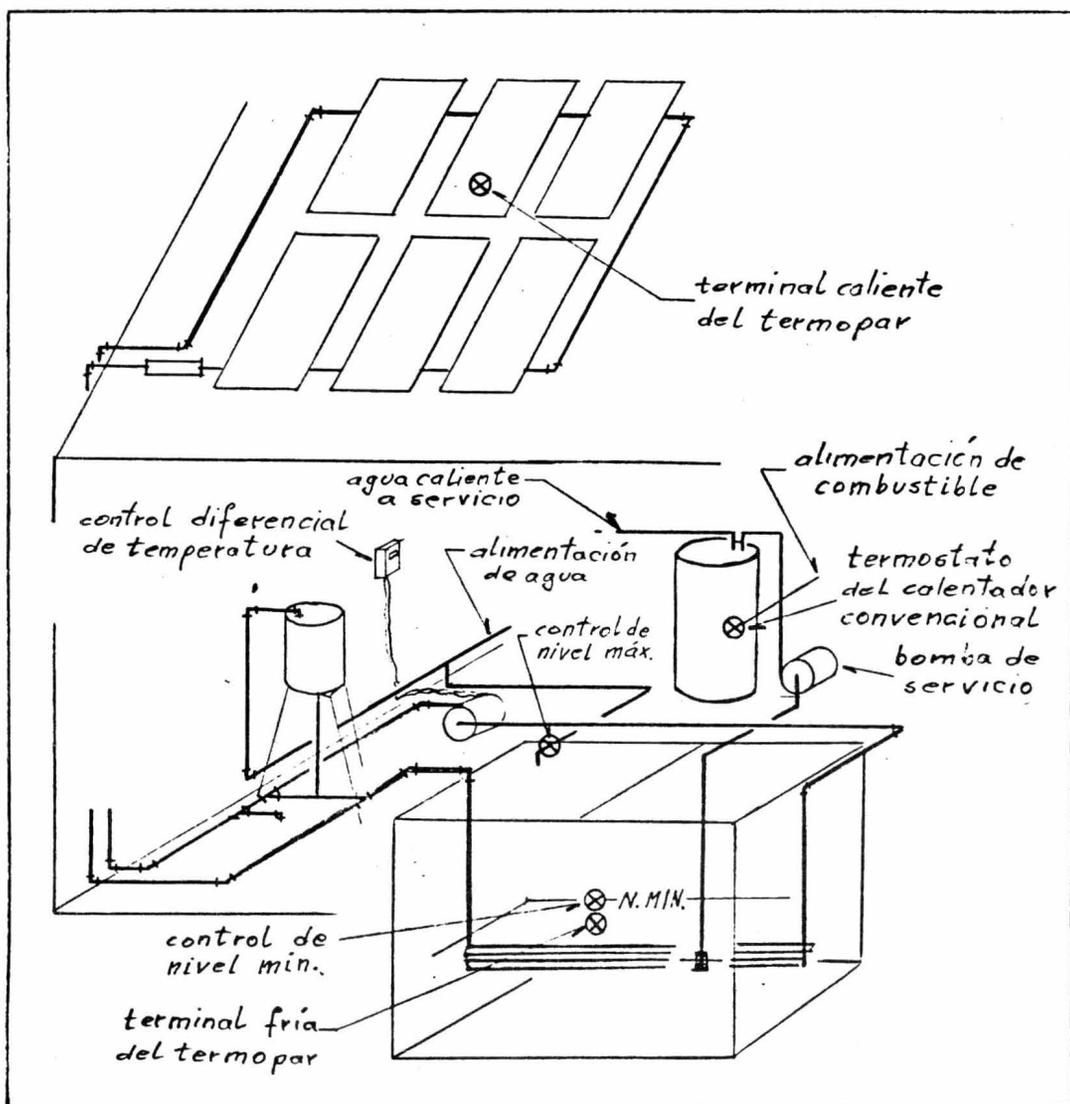


Fig.1.2.1.5.a. Localización de Controles en el Sistema Calefactor Solar

1.2.1.6.- ESTUDIO ECONOMICO.

Debe aclararse que el diseño del sistema solar no se hizo con el fin de suplir en todo momento los requerimientos totales de energía térmica para calentar el agua de servicio, ya que resultaría un sistema altamente -- costoso. No se pretende que el sistema solar sea un sustituto del sistema de calentamiento convencional, sino que su fin fundamental es ahorrar costos en combustibles cuando las condiciones de radiación solar lo permiten.

Por lo tanto, debe considerarse al sistema solar de calentamiento de agua como un posible sistema complementario en una casa ya establecida. El diseño de una casa nueva deberá hacerse considerando el sistema solar adicional y diseñar el sistema convencional con una capacidad menor.

Para calcular el tiempo de amortización del sistema solar, se comparará la inversión inicial en el equipo, los costos de operación y de mantenimiento contra el posible ahorro en combustibles.

El análisis que se presenta a continuación tiene como fin establecer el precio actual del sistema adicional que coadyuve, o en condiciones favorables, realice el calentamiento total del agua de servicio en una casa convencional para seis u ocho personas operando en el Valle de México, por medio de la captación de la energía térmica solar.

Se realizó un estudio de los posibles materiales de construcción,-

con el objeto de presentar el diseño con los que son actualmente disponibles en el país. Basándose en los precios actuales, se escogieron los materiales más económicos que cumplan con los requerimientos necesarios.

El diseño del sistema calefactor solar involucra los siguientes elementos:

1. Sistema Captador de la energía térmica solar.
2. Tanque aislado térmicamente para almacenamiento.
3. Tubería y Bomba de recirculación.
4. Sistema de Control.

INVERSION O COSTO FIJO

Se realizó una investigación sobre la disposición y el precio actual de los materiales susceptibles de ser utilizados en el diseño.

COSTO DEL COLECTOR

Cajón

Considerando el esquema de la Fig. 1.2.1.6.a. que muestra el perfil del diseño posible de realizar contando con materiales plásticos que pueden ser extruídos como es el caso del PVC (Cloruro de Polivinilo) y el Polipropileno, para los cuales se cuenta con maquinadores en México.

En base a que, por lo general, los fabricantes hacen sus cotizaciones en términos de precio por unidades de masa o de volumen, se hace ne-

cesario determinar las cantidades necesarias de materiales para cada uno de los casos que se tomarán en consideración.

El volumen de los cuatro laterales será:

$$\text{Volumen 2 anchos} = 2 (100 \text{ cm}) (11.75 \text{ cm}^2) = 2350 \text{ cm}^3 = 2.35 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen 2 largos} = 2 (200 \text{ cm}) (13.75 \text{ cm}^2) = 5500 \text{ cm}^3 = 5.50 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen total de los 4 laterales} = 7.85 \text{ dm}^3$$

Para el caso en el cual se determinara colocar piso completo al cajón, se consideraría una placa cuyo volumen sería:

$$\text{Volumen placa} = (20 \text{ dm}) (10 \text{ dm}) (0.05 \text{ dm}) = 10 \text{ dm}^3$$

Determinación del precio, considerando realizar el cajón en Cloruro de Polivinilo (PVC).

El PVC tiene una densidad de 1.4 gr/cm^3 , entonces el peso del cajón, considerando en colocarle el piso completo será:

$$\text{Peso} = (17.85 \text{ dm}^3) (1.4 \text{ Kg/dm}^3) = 24.99 \text{ Kg.}$$

Si se decidiera no colocarle el piso, el peso sería:

$$\text{Peso} = (7.85 \text{ dm}^3) (1.4 \text{ Kg/dm}^3) = 10.99 \text{ Kg.}$$

Considerando que el precio por Kilogramo maquillado de PVC es de - 60.00 pesos, entonces el precio para el primer caso sería:

$$\begin{aligned} \text{Precio Cajón con piso completo} &= (24.99 \text{ Kg}) (60 \text{ pesos /Kg}) = \\ &= 1499.40 \text{ pesos} \end{aligned}$$

Si se decidiera no colocarle piso completo, el precio:

$$\text{precio cajón semipiso} = (10.99 \text{ Kg}) (60 \text{ pesos/Kg}) = 659.40 \text{ pesos}$$

Determinación del precio del cajón considerando realizarlo de una combinación de Polipropileno para los laterales y como piso una placa de -- Acrílico:

El polipropileno que se considerará es el que tiene una densidad de 0.97 gr/cm^3 , el peso de los 4 laterales será:

$$\text{Peso 4 laterales} (7.85 \text{ dm}^3) (0.97 \text{ Kg/dm}^3) = 7.61 \text{ Kg.}$$

Precio por Kilogramo maquilado de polipropileno es de 52.00 pesos, por lo cual el precio de los 4 laterales sería:

$$\text{Precio} = (7.61 \text{ Kg}) (52 \text{ pesos/Kg}) = 395.75 \text{ pesos.}$$

El precio de la placa de acrílico que serviría de piso, considerando que el precio por m^2 de lámina con 3 mm de espesor es de 180.00 pesos sería:

$$\text{Precio lámina piso} = (2\text{m}^2) (180 \text{ pesos/m}^2) = 360.00 \text{ pesos}$$

El precio del cajón considerando esta combinación sería:

$$\text{Precio} = 395.75 \text{ pesos} + 360.00 \text{ pesos} = 755.75 \text{ pesos}$$

A continuación se presenta un estudio del precio, considerando -- que el cajón fuera fabricado con material metálico recubierto con pinturas plásticas anticorrosivas.

El perfil de los laterales, maquilados en material metálico, se muestra en la figura 1.2.1.6.b.

En este caso, el volumen de los cuatro laterales es:

$$\text{Volumen 2 anchos} = 2 (100 \text{ cm}) (7.5 \text{ cm}^2) = 1500 \text{ cm}^3 = 1.50 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen 2 largos} = 2 (200 \text{ cm}) (9.0 \text{ cm}) = 3600 \text{ cm}^3 = 3.60 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen total de los 4 laterales} = 5.10 \text{ dm}^3$$

Si se decidiera colocar piso completo al cajón, la placa que serviría para este fin, tendría un volumen de:

$$\text{Volumen placa} = (10 \text{ dm}) (10 \text{ dm}) (0.02 \text{ dm}) = 4 \text{ dm}^3$$

De esta manera, el volumen total del cajón, considerando que tuviera el piso completo sería:

$$\text{Volumen total del cajón (piso completo)} = 9.1 \text{ dm}^3$$

El peso del cajón, considerando que se maquinaria de fierro negro con una densidad de 7.9 gr/cm^3 , sería:

$$\text{Peso cajón (piso completo)} = (9.1 \text{ dm}^3) (7.9 \text{ Kg/dm}^3) = 71.89 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso cajón (semipiso)} = (5.1 \text{ dm}^3) (7.9 \text{ Kg/dm}^3) = 40.29 \text{ Kg.}$$

Tomando en consideración que el precio por kilogramo de fierro maquilado, de acuerdo al diseño propuesto, es de 9.10 pesos, entonces:

$$\text{Precio cajón (piso completo)} = (81.89 \text{ Kg})(9.10 \text{ pesos/Kg}) = 654.20 \text{ pesos}$$

$$\text{Precio cajón (semipiso)} = (40.29 \text{ Kg}) (9.10 \text{ pesos/Kg}) = 366.65 "$$

Para calcular el volumen necesario de recubrimiento anticorrosivo, se tiene que considerar el área de la superficie del posible cajón:

$$\text{Area cajón (semipiso)} = 2 (0.54 \text{ m}^2) + 2 (0.23 \text{ m}^2) = 1.54 \text{ m}^2$$

$$\text{Area cajón (piso completo)} = 1.54 \text{ m}^2 + 4.00 \text{ m}^2 = 5.54 \text{ m}^2$$

Considerando como recubrimiento anticorrosivo una pintura epóxica no esterificada poliamida que da un rendimiento de 8 m² por litro según especificaciones, el volumen necesario sería:

$$\begin{aligned} \text{Volumen pintura requerida (cajón semipiso)} &= (1.54\text{m}^2)(0.125\text{lt/m}^2)= \\ &= 0.19 \text{ lt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen pintura (cajón piso completo)} &= (5.54\text{m}^2)(0.125\text{lt/m}^2)= \\ &= 0.69 \text{ lt} \end{aligned}$$

El precio de esta pintura sería:

$$\begin{aligned} \text{Precio pintura (cajón semipiso)} &= (0.19 \text{ lt}) (113.94 \text{ pesos/lt})= \\ &= 21.65 \text{ pesos} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Precio pintura (cajón piso completo)} &= (0.69 \text{ lt}) (113.94 \text{ pesos})= \\ &= 78.60 \text{ pesos} \end{aligned}$$

El precio total del cajón maquilado de fierro y recubierto con es

ta pintura epóxica sería:

$$\text{Precio total (cajón sempiso)} = 388.30 \text{ pesos}$$

$$\text{Precio total (cajón piso completo)} = 732.80 \text{ pesos}$$

Existe también en el mercado otro recubrimiento que puede ser también utilizado, aunque su protección resulta de menor calidad y duración, - se trata de una pintura plástica a base de hule clorado que según especificaciones, da un rendimiento aproximado de 4 m^2 por litro; el volumen requerido de pintura sería:

$$\begin{aligned} \text{Volumen pintura (cajón semipiso)} &= (1.54 \text{ m}^2)(0.25 \text{ lt/m}^2) = \\ &= 0.385 \text{ lt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen pintura (cajón piso completo)} &= (5.54 \text{ m}^2)(0.25 \text{ lt/m}^2) \\ &= 1.385 \text{ lt} \end{aligned}$$

El precio de esta pintura considerando que el litro cuesta 46.03-pesos sería:

$$\begin{aligned} \text{Precio pintura (cajón semipiso)} &= (0.385 \text{ lt}) (46.03 \text{ pesos/lt}) = \\ &= 17.70 \text{ pesos} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Precio pintura (cajón piso completo)} &= (1.385 \text{ lt})(46.03 \text{ pesos/lt}) = \\ &= 63.75 \text{ pesos} \end{aligned}$$

Para el caso de decidir construir el cajón de fierro y recubrirlo con esta pintura de hule clorado, el precio total del cajón sería:

$$\text{Precio total (cajón semipiso)} = 384.35 \text{ pesos}$$

$$\text{Precio total (cajón piso completo)} = 717.95 \text{ pesos}$$

Existe la posibilidad de hacer el cajón de fibra de vidrio reforzada, tanto los laterales como el piso. La fabricación del cajón con este material requiere de técnicas especiales, así como de moldes para trabajar sobre ellos. Sin embargo, se le puede dar casi cualquier rigidez y acabado y es un material que resiste muy bien a la intemperie y además es buen aislante. Los moldes son caros, pero se pueden usar indefinidamente.

El precio del cajón, sin considerar la inversión en los moldes, es de 500 pesos sin piso. Usar una placa de fibra de vidrio para el piso resulta antieconómico, pudiéndose usar en ese caso mejor una placa de acrílico o de polipropileno.

El material requerido para formar el piso del cajón eleva considerablemente el precio del mismo, y además, tomando en cuenta que el colector irá colocado en el techo de la casa, sobre una base de cemento plana e inclinada, no requiere de protección en el fondo. La hermeticidad se logra al adherir la placa aislante de poliestireno a los costados y a la ceja inferior del perfil de los mismos; por lo cual, se considerarán únicamente las alternativas con semipiso.

El diseño con PVC tiene un costo elevado y las características de este material no lo hacen aplicable en este caso, ya que puede ser degradado por la radiación solar, acortando su vida media.

Tanto el diseño con polipropileno ahulado como con lámina de hierro recubierta con pintura plástica anticorrosiva resultan aproximadamente con el mismo costo, sin embargo el polipropileno ahulado tiene la ventaja -

de ser más ligero y mucho mejor aislante térmico que la lámina de fierro; - además, la duración de las pinturas anticorrosivas protectoras, no se garantiza a más de 4 años, para el caso de la pintura epóxica, y a no más de 3, para el caso de la pintura a base de hule clorado, sin sufrir degradaciones, por lo cual requieren de un mantenimiento constante. El polipropileno ahulado es resistente a la intemperie y a la radiación solar además posee la rigidez necesaria, estas propiedades lo hacen ser el material idóneo para la construcción del cajón.

AISLANTE

Como aislante térmico y protección del fondo del cajón se requiere de una placa de poliestireno de 2 pulgadas de espesor, cuyo precio en el mercado nacional es de 50.00 pesos por cada metro cuadrado.

El precio de esta placa sería:

$$\text{Precio Placa de Poliestireno} = (2 \text{ m}^2)(50 \text{ pesos/m}^2) = 100.00 \text{ ₡}$$

CUBIERTAS DE VIDRIO

Son necesarias 2 cubiertas de vidrio de 3 mm de espesor cada una a razón de 78.60 pesos el metro cuadrado.

El precio de estas 2 cubiertas de vidrio sería:

$$\text{Precio cubiertas de vidrio} = 2(2\text{m}^2)(78.60 \text{ pesos/m}^2) = 314.60 \text{ pesos}$$

TUBOS ALETADOS

Los tubos aletados estruidos en aluminio serán cubiertos con una película de pintura negro mate, con un praimer como base constituido de cromato de zinc y posteriormente irá horneada a una temperatura igual a la temperatura máxima esperada en el equipo, esto es para que tengan la resistencia térmica deseada.

El costo total de este proceso considerando materiales y mano de obra es de 75.00 pesos por m^2 y será considerado como:

$$\text{Costo pintura tubos aletados por cajón} = (2m^2)(75 \text{ pesos}/m^2) = 150.00$$

Consideración del precio de los tubos aletados.

El precio por kilogramo maquilado de Aluminio es de 37.55 pesos

El peso de cada tubo aletado es de 2.57 Kg.

$$\text{Peso 6 tubos aletados por cajón} = 6(2.57\text{Kg}) = 15.42 \text{ Kg.}$$

El precio de tubos aletados por cajón será:

$$\text{Precio tubos aletados} = (15.42 \text{ Kg})(37.55 \text{ pesos}/\text{Kg}) = 579.00 \text{ pesos}$$

Entonces el precio total considerando tubos aletados y pintura es:

$$\text{Precio total tubos aletados} = 150.00 \text{ pesos} + 579.00 \text{ pesos} = 729.00 \text{ pesos}$$

ACCESORIOS

Se considerarán en esta sección los accesorios de unión entre cada uno de los tubos aletados y la unión que debe salir hacia la tubería de cobre inicial y final de todo el sistema colector y entre colector y colector. Todas estas conexiones serán realizadas por medio de manguera extruída,

de 1/2 pulgada de diámetro, un espesor de 3 mm y un largo de 8 pulgadas; de polietileno de baja densidad, cuyo precio por kilogramo maquilado es de - - \$ 48.00 y la densidad de este material es de 0.97 g/cm³, para fijar estas - mangueras se utilizaran abrazaderas de las de uso automotriz convencional, cuyo precio en el mercado es del orden de 3.00 pesos por cada unidad.

El volumen para considerar la cantidad de material necesaria para cada manguera es:

$$V = \frac{\pi}{4}(r_2^2 - r_1^2) h =$$

$$V = \frac{\pi}{4}(1.57^2 - 1.27^2) \text{ cm}^2 (20.32 \text{ cm}) = \frac{\pi}{4}(2.46 - 1.61)(20.32)$$

$$= \frac{\pi}{4}(0.85)(20.32)$$

$$V = 13.56 \text{ cm}^3$$

El peso de esta manguera será:

$$\text{Peso} = (13.56 \text{ cm}^3) (0.97 \text{ g/cm}^3) = 13.15 \text{ g.}$$

El precio por manguera es:

$$\text{Precio manguera conexión} = (0.01315 \text{ Kg}) (48 \text{ pesos/Kg}) = 0.63 \text{ pesos}$$

En el diseño del colector van a ser necesarias 7 mangueras por cada unidad, entonces el precio por concepto de las mangueras de conexión será:

$$\text{Precio 7 mangueras} = 0.63 \text{ pesos} \times 7 = 4.41 \text{ pesos}$$

Son necesarias 14 abrazaderas, considerando el precio unitario --

por abrazadera de 3.00 pesos, entonces el precio de las 14 abrazaderas será:

$$\text{Precio 14 abrazaderas} = 14 \times 3.00 \text{ pesos} = 58.00 \text{ pesos}$$

COSTO DEL TANQUE TERMICO

Se considerará al tanque térmico almacenador de acuerdo al diseño establecido, el cual contempla la superposición de 2 tanques construídos - con placas de asbesto y entre ellos va colocado poliestireno de acuerdo al diseño, para utilizar también el aire encerrado que quedará entre las cel-- das formadas con este poliestireno.

Se tiene que considerar que el tanque térmico, ya construido, va a quedar colocado bajo tierra en el sótano, lo cual hace que se deba tomar en consideración que se tendrá que construir una obra de albañilería que le da rá las condiciones óptimas para su sostenimiento.

El costo del tanque térmico, de acuerdo a estas consideraciones, se divide para su estimación en:

RECIPIENTE

Consideración del costo de las placas de asbesto necesarias para la construcción del tanque exterior.

Las placas que se tienen en el mercado adecuadas para nuestros fi nes serán las construidas con asbesto de 11.5 mm de espesor y de una longi tud de 8 pies y de ancho 4 pies y tienen un precio unitario de 246.60 pesos.

Para el caso del tanque exterior, con las siguientes dimensiones- 8 pies de largo por 4 pies de ancho x 8 pies de alto serán necesarias las - siguientes placas:

fondo y tapa:	2 placas.
frentes	2 placas.
costados	4 placas.
Total	8 placas.

El costo de las 8 placas será:

$$\text{Costo} = 8 (246.60 \text{ pesos}) = 1972.80 \text{ pesos}$$

El tanque interior será construido con placas del mismo largo y - ancho pero de 4.5 mm de espesor, estas placas tienen un costo unitario de - 88.00 pesos.

Para el tanque interior serán necesarias:

fondo	1 placa
frentes	2 placas
costados	4 placas
Total	7 placas

El costo de estas 7 placas será:

$$\text{Costo} = 7 (88.00 \text{ pesos}) = 616.00 \text{ pesos}$$

Hasta este momento el costo del recipiente es de 2588.80 pesos y-

ya que para el caso de unir las placas, el material necesario se toma como el 10%, era necesario calcular este subtotal que nos da el valor de las placas, considerando esto, el costo del material para las juntas es:

Costo juntas del recipiente = 260.00 pesos

Se tiene que tomar en cuenta también el costo de una placa de asbesto extra, que nos servirá posteriormente para colocar travesaños necesarios para fijar estos dos tanques que forman al recipiente.

La placa necesaria extra será de las mismas que se utilizan para forjar el tanque exterior (8 pies de largo, 4 pies de ancho y 11.5 mm de espesor).

Costo placa para travesaños = 246.60 pesos.

El costo total del recipiente por concepto de placas de asbesto y juntas será:

Costo recipiente = 3095.40 pesos.

INTERCAMBIADOR DE CALOR.

De acuerdo al diseño establecido para el intercambiador de calor, son necesarios 71 pies (21.65 m) de tubo de cobre de 1/2 pulgada y considerando que cada metro lineal de tubería tiene un costo de 13.00 pesos.

El costo de la tubería de cobre = 281.40 pesos

Son necesarios también considerar 24 codos de cobre de 90° con un costo unitario de 4.50 pesos

$$\text{Costo 24 codos} = 24(4.50 \text{ pesos}) = 108.00 \text{ pesos}$$

Por lo que el costo total del intercambiador de calor será:

$$\text{Costo intercambiador} = 389.40 \text{ pesos.}$$

AISLANTE

Este aislante irá colocado entre los dos tanques y tomando en --- cuenta el diseño de este aislante, son necesarias una cantidad determinada de placas de poliestireno, de las que existen en el mercado, las adecuadas son las de 1 m de largo, 1 m. de ancho y 1 pulgada de espesor, las cuales - tienen un costo unitario de 25.00 pesos.

Considerando que se tiene una área para cubrir de 24 m^2 .

$$\text{Costo de las 24 placas} = 24 (25.00 \text{ pesos}) = 600.00 \text{ pesos}$$

El diseño contempla una estructura cuadriculada que nos permite - utilizar además de la propiedad aislante del poliestireno, también la propiedad aislante del aire encerrado en cada una de las celdas que se van formando, de acuerdo a esto, será necesario estimar el costo de este material- para formar esta estructura.

Considerando el diseño, son necesarias 14 placas.

$$\text{Costo de las 14 placas} = 14 (25.00 \text{ pesos}) = 350.00 \text{ pesos.}$$

El costo total del aislante necesario para el recipiente será:

Costo Aislante = 950.00 pesos.

Costo de Tubería, Bomba de Recirculación y Accesorios

Por concepto de tubería se considerarán las válvulas requeridas - en el circuito cerrado de calentamiento y en el sistema de preparación y -- llenado, así como los tubos rectos de cobre de 1/2 pulgada de diámetro y -- sus uniones, o sea, codos y tes.

Por concepto de accesorios se consideran la trampa iónica, la plca de orificio y el tambor de 50 lt para preparación de la mezcla.

Se requiere el siguiente material, cuyo costo en pesos es:

Material.	Costo
7 válvulas de globo de 1/2 plg. a \$35.00 c/u	\$ 245.00
1 válvula de tres vías de 1/2 plg	\$ 228.00
40 metros tubo de cobre 1/2 plg. a \$13.00/m. lin	\$ 520.00
15 codos de cobre de 90° a \$ 4.00 c/u	\$ 60.00
4 tes de cobre a \$ 6.00 c/u	\$ 24.00
Total	\$ 1,077.00
bomba de 1/4 HP	\$ 700.00

Trampa iónica:

30 cm manguera de polietileno			
3 mm de espesor	a \$ 3.15/m	\$	0.95
1 brida y tornillos		\$	42.00
1 empaque		\$	1.50
2 abrazaderas	a \$ 3.00 c/u	\$	6.00
malla fina		\$	7.00
1.5 metros de alambre de aluminio			
calibre 21	a \$37.00/kg	\$	<u>3.70</u>
	T o t a l	\$	61.15

Placa de Orificio:

placa		\$	40.00
brida y tornillos		\$	42.00
empaque		\$	<u>1.50</u>
	T o t a l		83.50

Tambor de 50 lt con cople de salida		\$	116.00
-------------------------------------	--	----	--------

Costo del Sistema de Control

Controles de Nivel:

Nivel máximo:

válvula, varilla de unión y flotador		\$	110.00
--------------------------------------	--	----	--------

Nivel mínimo:

Control eléctrico de nivel marca Mercoid modelo 40-2R6 que incluye flotador, caja del interruptor con bornes de conexión		\$	1,900.00
--	--	----	----------

Control de la bomba de recirculación:

Termostato diferencial marca Honeywell modelo 1643A que incluye caja de interruptor y bornes de conexión	\$ 2,350.00
2 terminales de termopar de Fe-Const. cada una con su correspondiente accesorio para fijarla	\$ 300.00
10 metros de cable Duplex de cobre cal. 18 para extensión del termopar	\$ 35.00
T O T A L	\$ 4,695.00

Costo Total del Sistema Colector de la Energía Térmica Solar

Para tomar en cuenta los costos de instalación de los equipos se considerará un porcentaje de su costo, dependiendo del trabajo necesario en cada caso para este fin.

En el caso de los colectores se considerará un porcentaje adicional por riesgo en el transporte e instalación de las cubiertas de vidrio -- por concepto de posibles vidrios rotos.

En la tabla 1.2.1.6.a. se muestra el costo total en moneda nacional de cada uno de los equipos en el sistema calefactor solar y el respectivo costo de instalación.

Tabla 1.2.1.6.a. Costos Fijos del Sistema Calefactor Solar

Equipo	
Colectores Solares Planos	\$ 9,609.30
10% costo de instalación	960.95
4% riesgos	384.00
Tanque Térmico	4,514.10
25% costo de instalación	1,128.55
Bomba y Tubería	2,037.65
10% costo de instalación	203.75
Sistema de Control	4,695.00
3% costo de instalación	<u>170.00</u>
T o t a l	\$ 23,704.15

La inversión I en el sistema solar calefactor será de aproximadamente \$ 23,700.00

Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos de operación prácticamente se refieren únicamente a la operación de la bomba de recirculación, que trabaja normalmente nueve horas diarias.

Siendo la bomba de 1/4 de caballo, se consumen mensualmente:

Energía Eléctrica

Consumida: $1/4 \text{ HP} \cdot 0.7457 \text{ kW/HP} \cdot 9 \text{ h/día} \cdot 30 \text{ día/mes}$

E.E.C. = 50.33 kWh/mes

Por lo tanto, y considerando un costo de 82 ctv./kWh, el costo de operación mensual de la bomba será de:

$$C_{op} = 50.33 \text{ kWh/mes} \cdot 0.82 \text{ pesos /kWh}$$

$$C_{op} = 41.27 \text{ pesos/mes}$$

El costo de mantenimiento se refiere principalmente al mantenimiento requerido por los colectores solares y la supervisión de la mezcla de agua-etilenglicol en el circuito cerrado de calentamiento.

El mantenimiento o servicio que requieren los colectores solares es el lavado periódico de la cubierta exterior de vidrio. Las condiciones atmosféricas de la zona en estudio dejan prever un rápido depósito de polvo sobre la misma, que puede disminuir grandemente la transmitancia de los rayos solares. Por lo tanto deberá ser lavada cada tercer día aproximadamente, de preferencia en la mañana.

Las cubiertas de vidrio son además susceptibles de romperse, ya sea por defectos de fabricación o factores externos. El rompimiento por defectos en su fabricación o instalación suelen ocurrir al poco tiempo de haberse empezado a operar el sistema, por lo cual se cargan como riesgo en la inversión inicial. Otros factores externos son improbables, ya que con su localización en el techo de la casa, los colectores quedan bien protegidos.

Por concepto de supervisión se considera necesaria una hora al mes, a razón de 16 pesos/h. Para dar servicio a los colectores se requieren cuatro horas al mes a razón de 8 pesos/h, o sea, 32 pesos/mes.

El costo total de operación y mantenimiento es:

$$C_v = C_{op} + C_{ma} = 41.27 \text{ pesos/mes} + 48.00 \text{ pesos/mes}$$

$$C_v = 89.27 \text{ pesos/mes}$$

Ahorros en Combustible

El cálculo de ahorros en combustible a lo largo del año se basará en la estimación hecha del requerimiento energético de una casa convencional. Dicha estimación arrojó un valor de aproximadamente 163000 Btu/día, - que transformado a un valor mensual resulta en:

$$Q_c = 163000 \text{ Btu/día} \cdot 30 \text{ día/mes} = 4.89 \cdot 10^6 \text{ Btu/mes}$$

Basándose en la tabla 1.2.1.3.a. se considerará que en ocho meses del año el sistema solar proporciona el total del calor requerido. En los cuatro meses restantes el calor que debe suministrar adicionalmente el calentador convencional es de:

Mes	Btu/día
Junio	5,064
Julio	70,962
Agosto	198
Septiembre	<u>234</u>
T o t a l	76,458 Btu/día·30día/mes= 2.29·10 ⁶ Btu

que es aproximadamente la mitad del requerimiento energético normal en un mes. Por lo tanto se puede considerar que el sistema solar proporciona la-

energía calorífica necesaria 11.5 meses en un año.

El combustible más comunmente usado en calentadores convencionales es gas butano, con un poder calorífico neto de 19680 Btu por libra de gas licuado. Dichos calentadores trabajan con una eficiencia térmica de -- aproximadamente el 80%.

Para suministrar el calor proporcionado por el sistema solar a lo largo del año se requerirían:

$$\text{gas requerido: } \frac{4.89 \cdot 10^6 \text{ Btu/mes} \cdot 11.5 \text{ mes} \cdot 0.454 \text{ kg/lb}}{19680 \text{ Btu/lb} \cdot 0.8}$$

$$\text{g.r.} = 1621.61 \text{ kg.}$$

El costo del gas butano entregado para uso doméstico es en la actualidad de 2.10 pesos/kg, por lo cual el posible ahorro anual en combustible sería de:

$$C_{\text{ah.}} = 1621.61 \text{ kg} \cdot 2.10 \text{ pesos/kg} = 3405.39 \text{ pesos/año}$$

Tiempo de Amortización

El cálculo de tiempo de amortización se hará comparando la inversión inicial y costos de operación y mantenimiento con los posibles ahorros en combustibles.

De acuerdo con los costos y ahorros anteriormente establecidos y sin considerar ningún tipo de interés sobre la inversión inicial ni factores por inflación de la moneda y elevación de precio en los combustibles de

rivados del petróleo, se tiene que:

$$n = I/R$$

donde: n : tiempo de amortización

I : inversión inicial

$$R = C_{ah.} - C_v$$

por lo tanto tenemos que:

$$R = 3405.39 \text{ pesos/año} - 1071.24 \text{ pesos/año} = 2334.14 \text{ pesos/año}$$

$$n = 23700 \text{ pesos}/2334.15 \text{ pesos/año} = 10.15 \text{ años}$$

1.2.1.7. Conclusiones

Del estudio anterior sobre la captación de la energía térmica solar por medio de colectores planos se pueden concluir varios aspectos:

- Los resultados del análisis teórico de la captación de la radiación solar en la zona estudiada, o sea, en el Valle de México, fueron altamente positivos, aun con las desventajas que se tienen debido a las condiciones atmosféricas en este lugar y a su emplazamiento. De ello se puede deducir que se pueden esperar mejores eficiencias del sistema solar en lugares más calientes y de atmósfera despejada, como son las zonas costeras y el norte del país.

- Es factible construir el equipo requerido por el sistema solar con materiales elaborados en el país, exceptuando lo que concierne al sistema de control automático. Es este sistema el que eleva considerablemente el costo, y es de suponerse que el mismo se reducirá notablemente cuando -

los controles necesarios sean adquiribles de fabricación en el país.

- El sistema solar para calentar agua de uso doméstico resulta sumamente sencillo de elaborar e instalar. Aunque puede ser adaptado a casas en uso, se recomienda su instalación en casas especialmente diseñadas para trabajar con dicho sistema, ya que en ese caso se pueden observar las medidas requeridas para su óptimo funcionamiento.

-Aunque el tiempo de amortización calculado resulta alto en la actualidad, no significa que en un futuro próximo siga siéndolo. Considerán-dole al sistema solar una vida útil de 20 años, aun en las circunstancias actuales, proporciona un lapso de aproximadamente nueve años y medio de utili-dades en forma de ahorros en combustibles. Con la tendencia general de su-bir el precio de los combustibles derivados del petróleo, es de esperarse - que aquí en México también se eleven dichos precios en un futuro próximo. - De ser así, el tiempo de amortización del sistema solar se acortaría y la - inversión en el mismo se haría más rentable. No debe olvidarse que la for-ma de energía que alimenta al sistema solar es gratis y no contamina el am-biente.

1.2.2. Aire acondicionado y calefacción solares.

Aunque ambos temas quedan fuera del objetivo de este trabajo se--rán discutidos brevemente, ya que deberán ser tomadas en cuenta si se hace un estudio de autosuficiencia energética para casas en algunas regiones del país. Las características climatológicas del Valle de México no requieren-

la instalación de dichos servicios en las casas.

1.2.2.1. Calefacción solar.

La calefacción solar de una casa se hace generalmente con un sistema que consta de un panel colector de la energía solar, un fluido transportador del calor, un sistema de conducción y bombeo del mismo, un medio de almacenamiento de la energía térmica y un calentador convencional.

El fluido puede ser agua o aire.

Ya que el sistema para calefacción es idéntico al que se usa para calentar agua de servicio, este último puede ser implementado para dar ambos servicios. La carga de calor que debe suministrar será mayor y se usará un intercambiador de calor adicional aletado para transferir la energía térmica al aire. Este es circulado a través de la casa por medio de un sistema especial de ductos y un ventilador. Para almacenar el calor se usa un tanque de agua térmicamente aislado de gran capacidad.

Cuando únicamente se va a usar el sistema solar para calefacción de la casa se recomienda usar como fluido de transporte directamente el aire, ya que esto evita el paso poco eficiente de transferir el calor del agua al aire. En este caso se usa generalmente un lecho de esquirlas de roca como medio de almacenamiento.

Se ha tratado de almacenar la energía térmica utilizando el calor latente de materiales que cambian su estado físico a una temperatura apropiada. Pero se han tenido problemas de subenfriamiento y dificultades para

lograr una buena transferencia del calor, lo que hace que haya evolucionado más la técnica del calor sensible.

1.2.2.2. Acondicionamiento de aire.

Para acondicionar el aire de una casa se ha usado la energía solar principalmente para energizar sistemas refrigeradores de absorción, usando tanto ciclos de agua y amoníaco como agua y bromuro de litio. El uso de un motor solar para mover el compresor del sistema es una alternativa.

El colector del sistema puede ser similar al usado para calentar el agua de servicio, pero deberá suministrar calor a temperaturas más altas. Un sistema refrigerador usando la mezcla de agua y amoníaco, calentado con gas opera generalmente a una temperatura de ebullición de 350°F (177°C), -- aunque puede operar a una temperatura de 250°F (121°C) a media capacidad. - Un acondicionador de aire con mezcla de agua-bromuro enfriado con aire requiere una temperatura de 230°F (110°C); enfriado con agua puede operar - - aproximadamente a 200°F (94°C).

Un sistema auxiliar puede suministrar el calor requerido para operar los refrigeradores en el caso de que la radiación solar sea desfavorable. Es posible usar un lecho de esquirlas de roca para almacenar frío para uso en las noches y días nublados, circulando el aire caliente de la casa a través de él para enfriarlo. Otra alternativa sería almacenar calor para operar el sistema de aire acondicionado. Sin embargo el uso de los -- sistemas de almacenamiento de energía térmica comunes resultaría caro y poco eficiente en este caso, ya que se requiere almacenar calor a altas tempera-

turas. El uso de un ciclo interrumpible de refrigeración permitiría almacenar el refrigerante en condiciones de absorber calor, proviendo de este modo una forma de almacenamiento de calor latente.

Poco se ha hecho hasta ahora al respecto y no se ha fabricado aún comercialmente un sistema de aire acondicionado operado con energía solar.

Debido a las altas temperaturas requeridas en un sistema de acondicionamiento de aire se hace necesario el desarrollo de colectores solares mucho más eficientes. El estudio de un sistema integrado que suministre calor tanto para calentar el agua de servicio como para acondicionar el aire de la casa para épocas de frío y de calor es necesario, con el fin de hacer tal sistema económicamente viable.

R E F E R E N C I A S

- (1) J. F. Kreider and F. Kreith. Solar Heating and Cooling. Hemisphere Publishing Co. ,Washington D.C. , 1975, Capítulo 3, pág. 68 y 69.
- (2) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Capítulo 7, pág. 120-177.
- (3) I. Galindo. Reporte del Año Internacional Geofísico. Instituto de Ciencia Aplicada de la U.N.A.M., México, 1958, pág. 64.
- (4) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Secciones 3.6. y 3.7, pág. 48-55.
- (5) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Capítulo 3, pág. 21-60.
- (6) I. Galindo. Reporte del Año Internacional Geofísico. Instituto de Ciencia Aplicada de la U.N.A.M., México, 1958, Figuras I y II, pág. 63.
- (7) I. Galindo. Reporte del Año Internacional Geofísico. Instituto de Ciencia Aplicada de la U.N.A.M., México, 1958, Figuras III,IV y V, pág. 64,65 y 68.
- (8) J. A. Duffie and W.A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Sección 7.4. , pág.125-138.

- (9) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, pág. 133.
- (10) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Secciones 7.5. y 7.7., pág. 138-143 y 146-151.
- (11) J. A. Duffie and W. A. Beckman. Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974, Sección 7.6., pág. 143-146.
- (12) D. F. Rudd and C. C. Watson. Strategy of Process Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1968, Sección 3.6., pág. 45-49.
- (13) Crane. Flow of Fluids. Technical Paper No.410. Crane Co. New York, 1969, pág. A-24.
- (14) Donald Q. Kern. Procesos de Transferencia de Calor. C.E.C.S.A. México, 1969, Figura 25, pág. 940.
- (15) I. Galindo, A. Muhlia y A. Leyva. Un Método de Análisis de la Duración de la Insolación y sus Aplicaciones Prácticas. Anuales del Instituto de Geofísica, U.N.A.M. , Vols. 18-19, 1972-1973, México, 1975, pág. 41-44.
- (16) Donald Q. Kern. Procesos de Transferencia de Calor. C.E.C.S.A., México, 1969, Capítulo 3, pág.25-61.
- (17) Donald Q. Kern. Procesos de Transferencia de Calor. C.E.C.S.A., México, 1969, Capítulo 2.
- (18) Crane. Flow of Fluids. Technical Paper No.410. Crane Co. New York, 1969, pág.2-14,2-15 y A-20.

B I B L I O G R A F I A

- J. F. KREIDER AND F. KREITH, Solar Heating and Cooling. Hemisphere Publishing Co. Washington, D.C. 1975.
- Wilson CLARK, Energy for Survival. Anchor Books. New York, 1975.
- J. A. DUFFIE AND W. A. BECKMAN, Solar Energy Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York, 1974.
- J. R. WILLIAMS, Solar Energy, Technology and Applications. Annarbol Science Publisher. 1974.
- COLORADO STATE UNIVERSITY, Design and Construction of a Residential Solar Heating and Cooling System. National Science Foundation Ed. August, 1974.
- D. F. RUDD AND C. C. WATSON, Strategy of Process Engineering. John Wiley and Sons New York. 1968.
- D. Q. KERN, Procesos de Transferencia de Calor. C.E.C.S.A. México, 1969.
- CRANE, Flow of Fluids. Technical Paper No.410. Crane Co. New York. 1969.

I. GALINDO, A. MUHLIA y A. LEYVA, Un Método de Análisis de la Duración de la Insolación y sus Aplicaciones Prácticas. Anuales del Instituto de Geofísica. U.N.A.M. Vols. 18-19, 1972-1973 México, 1975.

I. GALINDO, Reporte del Año Internacional Geofísico. Instituto de Ciencia Aplicada de la U.N.A.M. México, 1958.

J. PERRY, Chemical Engineers' Handbook, 5th. Edition. Mac Graw Hill, New York.

CAPITULO 2.

ENERGIA EOLICA

2.1. Introducción

El viento ha jugado un papel importante en el desarrollo de la civilización, al ser usado desde épocas remotas para impulsar los barcos de vela, que constituyeron un medio de transporte rápido y económico. Por otro lado, fue el viento la primera mayor fuente de energía mecánica, a través de los molinos de viento.

Existe actualmente la tendencia a usar tecnología moderna para -- aprovechar ingeniosamente la energía eólica, para asegurar una fuente más de energía para el futuro. Como es el caso con la energía solar, el aprovechamiento a gran escala de esta fuente de energía depende en gran parte de la aceptación, por parte de la sociedad, para usar nuevas formas de energía, como fue en su tiempo el uso de combustibles fósiles, a los que se les predice una lenta exterminación, así como el uso de metales y otros recursos para construir el equipo necesario que haga posible una era de consumo de energía renovable y no contaminante.

El viento se define como aire en movimiento, generalmente en forma horizontal, refiriéndose a las corrientes de aire que barren la superficie de la tierra. El viento es una manifestación secundaria de la tremenda cantidad de energía solar que incide sobre nuestro planeta, y tiene varias formas de originarse. El principal factor causante de los vientos que soplan cerca de la superficie terrestre es un cambio en la presión atmosférica, --

que altera la velocidad y dirección del viento. Estan, sin embargo, tan íntimamente ligados todos los factores causantes de movimientos de la masa atmosférica, que el cambio de presión antes mencionado también provoca cambios en temperaturas y precipitación.

Los vientos causados por cambio de presión son moderados por los diferentes elementos que configuran la superficie terrestre, como son árboles, colinas, montañas, desiertos, masas de agua, construcciones, para nombrar solo algunos. El flujo de viento es variable y solamente se pueden hacer observaciones de la probabilidad de su existencia en una determinada localidad. Existen regiones en el mundo donde el viento se puede predecir -- con mucha precisión, como son ciertos océanos y cadenas montañosas. Sin embargo, la probabilidad de su presencia en una determinada localidad debe -- ser basada en observaciones hechas directamente en dicho lugar.

Debido al carácter altamente variable del viento, se deberán hacer observaciones precisas de su comportamiento, velocidad y patrón en el lugar, si se piensa aprovechar su energía.

Dada la presencia generalizada del viento sobre la superficie terrestre, se ha tratado de normalizar la medida de su velocidad, instaurándose internacionalmente la escala de Beaufort. Haciendo referencia a dicha escala, encontramos que para transformar la energía eólica eficientemente a otras formas energéticas, ya sea para bombear agua o para generar electricidad, se requiere de una velocidad del viento en el rango del No. 3 al 6. -- Una brisa ligera, referida con el No. 3 en dicha escala, representa vientos de 8 a 12 millas/hr (3.5 a 5.3 m/s). Los números del 4 al 6 se refieren --

a vientos moderados, con velocidades de 13 a 31 millas/hr (5.7 a 13.8 m/s). Los números más altos se refieren a viento fuerte, tormenta y huracán, que contienen un alto grado de energía, pero que resultan también altamente destruictivos para hacer posible su aprovechamiento.

La Organización Meteorológica Mundial en Ginebra, Suiza, analizó la información y datos mundiales de viento para la sesión sobre Nuevas Fuentes de Energía de las Naciones Unidas, llevada a cabo en la ciudad de Roma en 1961. La Organización calculó que se puede aprovechar una energía equivalente a 20 billones de kW, expresado en capacidad eléctrica, de los vientos en varias localidades sobre la superficie terrestre.

2.2. Aprovechamiento de la Energía Eólica a Través de la Historia

En las siguientes secciones se examinará la conversión de la energía cinética del viento en otras formas. Se empieza por analizar la más antigua y ampliamente usada forma de aplicación, el aprovechamiento directo del viento para impulsar barcos de vela. La segunda sección describe el uso del viento para irrigación, bombeo de agua, molienda de grano y usos varios de su energía transformada en energía mecánica. La tercera sección -- describe la conversión de Energía Eólica en energía eléctrica.

2.2.1. Aprovechamiento Directo de la Energía Eólica

Desde tiempos remotos hasta el siglo pasado, la fabricación y uso de barcos de vela determinó el poderío económico y político de las naciones.

La primera aplicación conocida del barco de vela se remonta al año 2800 A.-C., por la cultura egipcia. Con el desarrollo de instrumentos precisos de navegación, como son el astrolabio y la brújula, que permitieron al hombre lanzarse a través de los océanos, el transporte en barco de vela alcanzó -- gran desarrollo. En el Siglo XVIII, con la aparición del sextante y el cronómetro, el barco de vela percibió un gran auge, tanto como barco de guerra como de comercio. En el Siglo XIX se diseñaron los grandes y eficientes -- barcos Cliper (algunos pasaban las 2 000 toneladas). Eran los barcos más - rápidos que habían sido construidos, pues podían navegar más de 400 millas - en un día con buen viento.

Los barcos de vapor, alimentados con carbón, que habían sido desarrollados en Inglaterra y Estados Unidos a finales del siglo XVIII, se esparcieron rápidamente durante el siglo siguiente, debido al crecimiento del comercio instigado por la Revolución Industrial. El aumento del comercio internacional cuadruplicó el tonelaje de los barcos mercantes entre los -- años de 1800 a 1860, superando a principios del siglo XX el tonelaje total - de las marinas mercantes del mundo 20 millones de toneladas. De este tone - laje, dos terceras partes estaban representados por barcos de vapor.

Los grandes barcos de vela se usaron aún algunos años más. Entre los últimos en desaparecer estuvieron algunos galeones de tres a cuatro máss tiles con velas cangrejas construidos en Estados Unidos y Canadá, que si - guieron transportando carga a lo largo de la costa Este de Norte América - hasta los años 30.

Algunas razones de que los barcos de vela no hayan sobrevivido -

hasta nuestros días, con algún diseño modificado que usará ambos vela y motor auxiliar, a pesar de las ventajas económicas del viento sobre los combustibles como fuente de energía son los siguientes:

Se llegaron a realizar varios experimentos para adaptar un barco que fuera impulsado tanto por vela como vapor, pero se llegó a la conclusión de que tal barco no costaba, debido al poco cupo que quedaba para carga después de acomodar la maquinaria de vapor y el equipo para producirlo, tanto como el aparejo del velamen y las cabinas para la tripulación requerida en aquel tiempo en un barco de vela.

Los barcos de vela de casco de acero eran demasiado pesados y poco eficientes en lo que se refiere al aprovechamiento del viento. Poco o nada se hizo el intento de utilizar en estos barcos maquinaria que aligerara el trabajo a la tripulación y redujera su número.

Los grandes barcos de vela americanos de casco de madera usaban un velamen altamente eficiente para aprovechar el viento, su mantenimiento era sencillo y barato y requerían de reducida tripulación. Gracias a la mejor información meteorológica las compañías navieras americanas pudieron elaborar tablas de tiempo más confiables, aprovechando más eficientemente los vientos. Estos barcos decayeron seguramente porque la construcción con madera de sus cascos no siguió el ritmo de la nueva tecnología y además las exorbitantes primas que había que pagar a los seguros por riesgo en la fragilidad en los cascos de madera, hicieron incosteable su operación.

Hoy en día, ha renacido la idea de utilizar barcos de vela como -

medio de transporte, sobre todo en Alemania, donde un astillero en el puerto de Hamburgo se ha decidido a construir el nuevo tipo Dyna de barco de vela. El diseño de los barcos Dyna encierra las ventajas que proporciona la tecnología moderna y que hicieron falta en aquellos barcos experimentales - del siglo pasado. El casco es hidrodinámicamente más eficiente y hace uso de aleaciones metálicas ligeras y suficientemente resistentes. Los conocimientos en aerodinámica han mejorado en mucho la eficiencia del velamen.

Con mejores instrumentos de navegación y predicciones meteorológicas mundiales más precisas, se prevee la posibilidad de aprovechar más eficientemente la existencia de vientos adecuados sobre los océanos.

La captación directa del viento para transporte sobre tierra firme resulta mucho más limitada, debido a la restricción direccional en las vías de comunicación. Sin embargo, se han hecho experiencias con trineos y vehículos ferrocarrileros impulsados por vela sobre las grandes planicies de la Tierra. Recientemente ha surgido un nuevo triciclo impulsado por --viento, usado para competencias de velocidad en las playas en muchas partes del mundo.

2.2.2. Transformación de la Energía Eólica en Energía Mecánica.

El aprovechamiento de la energía del viento transformándola en --energía mecánica se ha llevado a cabo a través de la historia por medio de molinos de viento para bombear agua e irrigación, así como para molienda de granos.

Los molinos de viento se construyeron por siglos en los lugares - en los que se podía tener certeza de que soplarían los vientos con cierta - regularidad durante casi todo el año. Ya desde tiempos remotos se observó - que los lugares más apropiados para la instalación de los molinos de viento son lugares elevados, como colinas, acantilados y planicies despejadas.

El primer uso de un molino de viento parece haber sido en Persia - con fines de irrigación y bombeo de agua. Entre los Siglos VII y X el moli - no de viento fué ampliamente usado por dicha cultura. Durante el Siglo XIII el uso de molinos de viento se expandió por Europa, usandose un diseño ins - pirado en el molino persa, que aprovechaba el viento por medio de velas que hacían rotar un eje. Durante dos siglos se perfeccionó el dispositivo rota - tivo para captar el viento y transferir su energía, a través de un eje prin - cipal a la maquinaria.

Las velas o aspas de los molinos de viento consistieron general - mente de un marco de madera con cierta inclinación o paso, sobre el cual se tensaba una manta capaz de ser extendida o enrollada, para variar la super - ficie expuesta al viento, con el fin de compensar las variaciones en su ve - locidad.

Desde un principio se notó la inconsistencia del viento tanto - - en su velocidad como en su dirección. Para compensar esto último se rotaba en un principio toda la construcción que sostenía las aspas y contenía la - maquinaria con cuadrillas de hombres o con malacates mal elaborados. Un pa - so adelante en el diseño de los molinos de viento lo dieron los holandeses - al diseñar una torre que constituía el cuerpo y contenía la maquinaria y un

techo rotativo que sostenía las aspas y que permitía colocarlas perpendiculares a la dirección del viento sin interrumpir la operación de la maquinaria. Esto se tenía que hacer manualmente hasta que a mediados del Siglo -- XVIII se ideó un control automático para tal fin, que consiste en una aleta que va sujeta perpendicularmente al plano de rotación de las aspas y se coloca sola paralela a la dirección del viento. Este control se usa aún hoy-en día y ha tenido aplicación también en la aviación y otros campos.

El diámetro de las aspas en este tipo de molinos de viento era de unos 10 metros y podían suministrar hasta 44 caballos de fuerza en un viento de 20 millas/hr. (8.8 m/s), por lo tanto trabajando con una eficiencia del 28%.

La Energía Eólica se utilizó considerablemente en Norte América - durante el siglo pasado al producirse la colonización de dicho territorio.- A mediados del siglo se estima que la energía aprovechada del viento equiva lía a un trabajo de 1.4 billones de caballos-hora. El equivalente de carbón que hubiera sido necesario quemar para producir dicho trabajo es de - - 11.83 millones de toneladas. Veinte años más tarde en el año de 1870, el - aprovechamiento de la energía del viento se redujo a la mitad, debido a la aparición y difusión de la máquina de vapor, lo que había sucedido con anterioridad en Europa. Sin embargo, a fines del Siglo XIX más de 30 000 molinos de viento operando en Dinamarca, Alemania, los Países Bajos e Inglaterra producían en energía mecánica el equivalente a un billón de kWh.

A finales del siglo pasado se impuso el uso en Norteamérica de un determinado tipo de molino de viento, debido a su eficiencia y durabilidad.

Dicho molino fue y es usado principalmente para bombeo de agua en ranchos y casas de campo. Su diseño surgió basado en la experiencia que se había tenido con otros tipos de molino. Se redujo el número de aspas a seis para mejorar el coeficiente potencia-peso, y hace uso de la veleta direccional.- Este tipo de molino de viento se esparció rápidamente, no sólo en Norteamérica, sino en varios países del mundo. Se usó ampliamente en México, en -- la península de Yucatán. Su eficiencia en transformar la energía del viento en energía mecánica es de aproximadamente un 44%. El diámetro de las aspas es de 4 metros y proporciona 1.6 caballos de fuerza en un viento de 20 - millas/hr. (aprox. 9 m/s). También puede operar con vientos de mucho menor velocidad, proporcionando 1/4 de caballo en un viento de 5 millas/hr (aprox. 2 m/s). Una gran ventaja de este tipo de molino de viento es su gran durabilidad. Las aspas y casi todo el equipo son de metal, y por lo tanto duran bastante más que los equipos contruidos con madera y manta.

A pesar de que la potencia suministrada por estos equipos no es - grande en vientos de baja velocidad, sí desarrollan un torque considerable, que les permite mover grandes cantidades de agua. Se han diseñado molinos- de viento mucho más eficientes para generar electricidad, pero requieren de velocidades de viento mucho mayores, como se verá en la siguiente sección.

Los molinos de viento para bombeo de agua se fabrican hoy en día- en diversos tamaños, con diámetros de aspas de 2 a 4.5 metros, generalmente se montan sobre una torre metálica de 10 a 12 metros de altura. Se les garantiza una vida media útil de 40 años.

Comparando costos con una bomba eléctrica se llegó a la siguiente conclusión:

El molino de viento cuesta 1200 dólares instalado y tiene una vida útil de 40 años. Una bomba eléctrica con potencia equivalente cuesta - aproximadamente 350 dólares y tiene una vida media útil de 5 años. Considerando un interés del 8% y un período de amortización de 20 años, el molino de viento tendrá un costo anual de 120 dólares/año. Considerando un costo de operación de la bomba de 96 dólares/año, su costo será de 180 dólares/año, de lo que se deduce, que el molino de viento resulta más económico para este tipo de servicio. Además, debe tomarse en cuenta que el molino de viento tendrá, una vez amortizado, todavía 20 años de servicio sin gastos de operación y con gastos de mantenimiento mínimos.

2.2.3. Transformación de la Energía Eólica en Energía Eléctrica

La transformación de energía eólica en energía eléctrica se lleva a cabo moviendo un generador eléctrico directamente por medio de aspas impulsadas por el viento. Generadores de viento tienen pocas aspas, generalmente dos o tres, y están diseñados para operar con vientos de velocidades altas, siendo la velocidad mínima de aproximadamente 15 millas /hr (aprox. 7 m/s). Se colocan sobre torres con gran altura. Generadores pequeños, -- con una salida de unos cuantos miles de watts, se colocan sobre torres de 15 a 20 metros de altura.

Molinos de viento usados para bombear agua, por el contrario, se diseñan con un gran número de aspas, que le permiten trabajar con vientos de baja velocidad. Generalmente se montan sobre torres de poca altura.

Para poder aprovechar un máximo de la energía del viento, el dise

ño del generador de viento debe ser cuidadosamente estudiado para un determinado tipo de viento susceptible de utilizarse para este fin.

La primera experiencia que se tuvo y que mejoró el diseño de los molinos de viento fue el hecho de que a partir de cierto valor, el área adicional de aspas no mejoraba la salida de potencia de los mismos. La experimentación en este campo ha establecido ciertos conocimientos adicionales, - que pueden servir de guía en el diseño de los generadores de viento.

Dos principios importantes establecen que la potencia que puede ser extraída de la energía eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento y proporcional al cuadrado del diámetro de las aspas, o sea:

$$\text{Potencia} \propto v_{\text{viento}}^3 \cdot d_{\text{aspas}}^2$$

El uso de torres altas se debe a que lejos de la superficie el viento sopla con mayor velocidad. Una diferencia de diez metros en altura, - cerca de la superficie, se traduce generalmente en un 20 o 30% de aumento en la velocidad del viento, lo que resulta de gran importancia en la potencia obtenible del viento debido a la 'Ley del Cubo'. Si la velocidad del viento se duplica, la potencia que se saca de él aumenta en un factor de ocho.

El diámetro de las aspas está limitado por el peso que presentan las mismas. Ya que deben girar generalmente con rapidez, se originan fuerzas centrífugas considerables. Por ello se usan materiales ligeros para su construcción, como lo son la madera, fibra de vidrio, aluminio o estructuras combinadas de los mismos y de papel y tela. El diámetro de las aspas -

es generalmente de unos cuatro metros para generadores pequeños y ha llegado a ser de hasta cincuenta metros en una planta que producía 1250 kWatt en las montañas de Vermont en los Estados Unidos. Dichas aspas fueron construidas de una aleación de aluminio que no resistió, debido a algunos detalles erróneos en su construcción.

La mayor planta experimental actual, el Proyecto Zero de la ERDA- (Energie Research and Development Association) Fig. 2.2.3.a., tiene una salida de 100 kW y el diámetro de sus aspas de aluminio es de 38 metros. Estas giran a 40 RPM en una velocidad óptima del viento de 18 millas/hr (8 m/s). El movimiento rotatorio de las aspas se transmite por medio de una caja de transmisión que aumenta las revoluciones, de 40 a 1800 RPM, que son las requeridas por el generador eléctrico.

Las aspas extraen más potencia en sus extremos, que giran a mayor velocidad lineal, que en el centro, cerca de la maza que las sujeta al eje de rotación. El coeficiente de "Velocidad en el Extremo" representa matemáticamente la relación que existe entre la velocidad de rotación en los extremos de las aspas y la velocidad del viento. Dicho coeficiente tiene generalmente un valor de 1 a 3 para molinos de viento y de 6 a 8 para generadores de viento.

Debido a que la mayoría de los aparatos eléctricos operan generalmente a 60 ciclos, la corriente proporcionada por un generador de viento debe corresponder a dicho ciclaje. Por lo tanto, dichos generadores deben girar en un rango muy limitado de revoluciones, condición que difiere con una característica del viento, cuya velocidad es altamente variable.

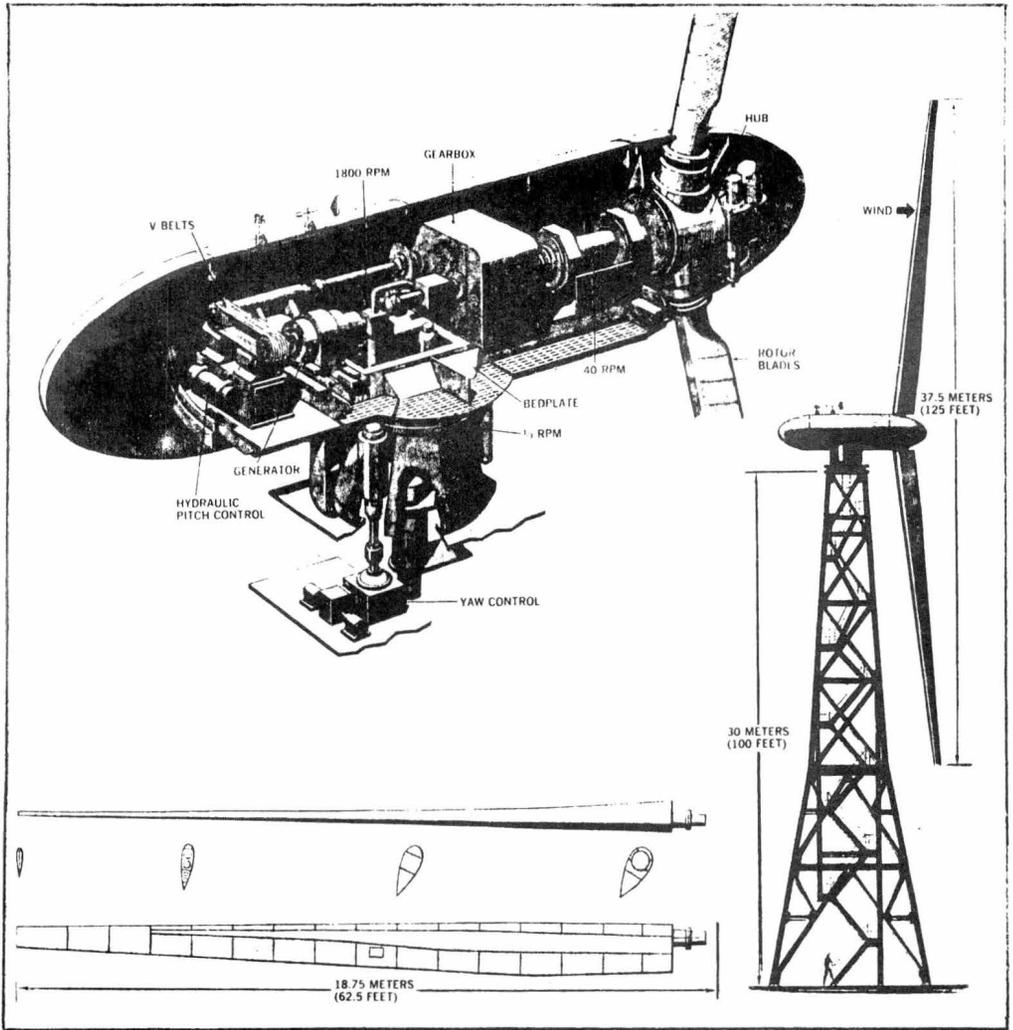


Fig.2.2.3.a. Generador Eléctrico de Viento
 Proyecto Zero de E.R.D.A.

Este problema se ha solucionado de diversas maneras. En las grandes plantas, como el Proyecto Zero de la ERDA, la velocidad de rotación de las aspas se mantiene constante dentro de un rango de velocidades de viento, variando el paso de las aspas, girándolas por medio de un mecanismo a través del eje de rotación. En esta planta, la velocidad de rotación de 40 RPM se puede mantener en un rango de velocidades de viento que va de 8 a 60 millas/hr (3.5 a 26.6 m/s). Fuera de este rango las aspas se colocan paralelas al movimiento del viento y dejan de girar.

Plantas más pequeñas, comercialmente disponibles, que producen de uno a cinco kW, proporcionan corriente directa, influyendo la velocidad a la que giran únicamente en la potencia de salida. La corriente directa se puede convertir en alterna por medio de cambiadores de frecuencia al ciclaje requerido. Sin embargo, estos aparatos generalmente de operación mecánica, tienen apenas una eficiencia de transformación del 60%. Aparatos electrónicos modernos, que operan en el estado sólido, presentan eficiencias de transformación de hasta un 80%.

Por otro lado, se ha desarrollado recientemente en Estados Unidos un generador especial para uso en generadores de viento. Dicho generador proporciona corriente alterna con el ciclaje requerido, no importando la velocidad de giro. En lugar de operar con un campo magnético constante, se controla al electroimán que lo causa con un oscilador electrónico, que permite generar corriente a cualquier frecuencia. Se cree que el perfeccionamiento de este tipo de generador y su uso en grandes plantas bajará considerablemente el costo de la energía eléctrica producida, haciéndola competitiva.

El uso de aspas para captar la energía del viento, limita el aprovechamiento a un valor teórico de 59.3%, según demostraciones matemáticas.- En la práctica, esta fracción es actualmente de un 48%.

Por ello se ha tratado de encontrar nuevas y variadas formas de captar la energía del viento y transformarla a un movimiento rotatorio. (Figuras 2.2.3.b.-f). Sin embargo, estas máquinas no han dejado de funcionar a nivel experimental.

Como es el caso con la energía solar, la energía eólica no siempre está disponible cuando se necesita, circunstancia que requiere que se almacene la energía sobrante en cierto momento para uso posterior. Esto es sobre todo necesario en plantas pequeñas.

En instalaciones domésticas se han utilizado generalmente bancos de acumuladores, ya que en su mayoría estas plantas producen corriente continua. Se fabrican acumuladores especiales para uso en plantas de viento, pero se pueden utilizar también los acumuladores comunes de plomo para uso en la industria automotriz. Estos acumuladores pueden ser cargados y descargados infinidad de veces sin presentar deterioro alguno. Presentan la desventaja de ser caros, llegando a ser la inversión en el banco de acumuladores de magnitud de la hecha en el equipo del generador de viento. La eficiencia que presenta un banco de acumuladores es en promedio de un 86.5%, tomando en cuenta la relación entre la energía eléctrica suministrada y la proporcionada por el sistema de acumuladores.

Actualmente se encuentra en desarrollo un nuevo tipo de acumulador, que pretende presentar menor costo y mayor eficiencia que el acumulador normal de plomo. Dicho acumulador, llamado Batería de Sal Fundida, -- trabaja a una temperatura de unos 260°C con sulfuro y sodio.

Por otro lado, se ha intentado almacenar la energía del viento, - ya transformada en movimiento giratorio, en forma de energía dinámica, por - medio de volantes. Muchos tipos de volante han sido estudiados, pero parece que el más efectivo es el disco con un gran momento de inercia. La energía acumulada por el volante es proporcional a su velocidad de giro, lo que hace necesaria una transmisión indirecta del movimiento rotatorio de las as pas. Las aspas en generadores de viento pequeños giran a una velocidad de aproximadamente unas 120 RPM, mientras que el volante deberá girar arriba - de las 20000 RPM. Un volante apropiadamente diseñado bajo estas bases y -- con un mínimo de pérdidas por fricción, tanto con el aire como en los apo-- yos, puede acumular energía suficiente para una semana sin viento.

Otra posibilidad de almacenamiento es la producción de hidrógeno- por electrólisis del agua con la energía eléctrica no utilizada. El hidró- geno sería comprimido y envasado para uso como combustible de alto grado. - No existen obstáculos técnicos grandes para generalizar el uso del hidróge- no como combustible, que en realidad es el principal candidato para susti-- tuir a los combustibles convencionales. Presenta ventajas tanto económicas como de no contaminante, ya que su combustión en el aire produce agua como- subproducto.

También se ha pensado almacenar la energía eléctrica sobrante, -- bombeando con ella agua a depósitos elevados, proporcionándole energía potencial susceptible de ser usada en cualquier momento, y comprimiendo aire, para aprovechar su energía de expansión.

Sin embargo, estas dos formas de almacenamiento tienen aplicación únicamente a gran escala, como para aprovechar la energía sobrante de grandes plantas para llenar presas o comprimir aire en grandes cavidades subterráneas naturales. Aunque se han hecho algunas experiencias con aire comprimido, se cree que las grandes plantas deberán preferiblemente ser conectadas a las redes de distribución establecidas para coadyuvar, cuando les sea posible, a las plantas convencionales.

A pesar de existir poblaciones suministradas en su totalidad de electricidad por plantas de viento, existen aún factores que limitan el uso generalizado de dichos generadores. La Energía Eólica se ha aprovechado en varios países del mundo desde la segunda década de este siglo para generar electricidad, resultando este sistema principalmente ventajoso en regiones sin suministro de tal energía por vías convencionales.

El factor limitante de mayor peso es el económico, pero se piensa que en un futuro, gracias al desarrollo tecnológico en este campo, se podrá bajar el costo de las plantas para que la energía eléctrica pueda ser generada a un nivel competitivo.

La producción en masa de generadores grandes de viento ayudaría para este efecto. De un estudio económico hecho en Estados Unidos en 1945-

por la Comisión Federal de Energía, se llegó a la conclusión que la producción en serie de tan solo diez plantas grandes de viento (de 7500 kW c/u) - podría bajar los costos de la energía eléctrica a 333 dólares/kW, comparado con un costo de 140 a 225 dólares/kW de la energía suministrada por plantas alimentadas con combustibles fósiles. El costo de una planta hidroeléctrica se reflejaba en un costo de la energía eléctrica de 350 a 600 dólares/kW.

Actualmente se tienen varias plantas de tamaño mediano (de hasta 100 kW) en experimentación, con el objeto de perfeccionar la tecnología en este campo, para aplicación en plantas mayores. Se realizan estudios y mediciones de viento en las regiones y lugares más favorecidos, con el fin de tener una base precisa y confiable de la posible energía aprovechable.

Casi en cualquier lugar puede ser aprovechada la energía del viento para impulsar generadores de mediano y gran tamaño, si se usan torres de mucha altura. Sin embargo, esto elevaría mucho el costo de la electricidad generada. Por ello deben aprovecharse aquellos lugares en los cuales el -- viento sopla favorablemente a poca altura, para integrar un sistema de plantas eléctricas de viento que se complementen a sí mismas al coadyuvar, con una fracción que puede llegar a ser considerable, en el suministro energético requerido por una nación.

Existen muchos y variados sitios favorables a este fin, como son montañas, planicies, istmos, costas quebradas y las grandes planicies oceánicas, aún cerca de las costas.

Se ha llegado hoy en día a la conclusión, de los estudios hechos-

sobre la Energía Eólica, que el viento, aún con su amplia variación diaria, es, deduciendo de sus promedios mensuales, una fuente de energía sorpresivamente estable y de gran potencial.

2.3. Posibilidad de Aprovechamiento de la Energía Eólica para Lograr la Autosuficiencia Energética en una Casa.

La energía del viento puede ser, y ha sido, utilizada para abastecer los requerimientos energéticos en una casa. Sin embargo, la posibilidad es limitada y no se puede decir, en forma generalizada, que sea factible en cualquier caso. Depende de varios factores, y es objetivo de esta sección analizarlos y poner en claro las circunstancias en las cuales se puede hacer uso de la Energía Eólica para hacer energéticamente autosuficiente una casa.

El factor principal es la existencia o no de vientos aprovechables a poca altura en un determinado lugar. Torres mayores de 20 metros de altura hacen incosteable la instalación de un generador de viento para suministrar electricidad a una casa.

Para hacer un proyecto a gran escala, de viviendas energéticamente autosuficientes a nivel rural, es requisito indispensable que, de observaciones generales, se determinen los lugares adecuados con vientos propios y se elabore un plan de medición de velocidades y duración de vientos, para establecer promedios mensuales y anuales con el fin de estimar el potencial energético aprovechable sobre el cual se base un estudio económico

co de la instalación de equipo de viento.

Las mediciones de velocidades y duración del viento deberán hacer se siempre que se tenga interés en instalar un equipo de viento, así sea na da más para coadyuvar un sistema de suministro establecido, si no se dispone de datos de otras fuentes informativas.

Se debe tener en cuenta también la existencia de servicios en la zona de interés y el costo de la energía. Lugares alejados, sin suministro energético convencional, favorecen el uso de equipo de viento, aun cuando - han sido instalados en ciudades para reducir las cuentas mensuales de energéticos. El uso generalizado de equipos de viento en una ciudad, poblaría la misma de torres, que podría llegar a ser antiestético. Además, en tal - caso, resultaría mucho más económico suministrar la energía eléctrica de -- plantas de viento de gran tamaño a través de las redes establecidas.

De gran importancia es el factor económico. Como se verá a conti nuación, la inversión en el equipo necesario para instalar una planta de -- viento que abastezca en todo momento una casa de electricidad, es actualmen te considerable. En gran parte se debe al sistema acumulador. En casos -- donde se puede prescindir de tal sistema, como es el caso en las casas don - de la planta de viento únicamente coadyuva en el suministro, la inversión - se puede reducir a casi la mitad.

El costo del generador de viento se reducirá si aumenta su acepta ción como fuente de energía, debido a la producción en gran escala de los - mismos. Existe la posibilidad de construir el equipo con maquinaria y pie-

zas adaptadas, por ejemplo, de la industria automotriz. Pero difícilmente se llega, en tal caso, a alcanzar la eficiencia y durabilidad de los equipos comerciales.

Es aconsejable, sin embargo, que para experimentar no se haga una inversión fuerte, utilizando diseños económicos como los que se muestran en las figuras 2.3.a. y 2.3.b.

2.3.1. Molinos de Viento.

Los molinos de viento tienen su mayor aplicabilidad en la agricultura. Se puede tener cierta certeza de que pueden ser utilizados en ranchos ganaderos y agrícolas para bombear agua, debido a la configuración de los mismos. Generalmente cuentan con extensiones abiertas de terreno donde sopla viento con fuerza suficiente para mover dichos molinos, que como se dijo con anterioridad, requieren de vientos de baja velocidad.

Existen actualmente dos fábricas en Estados Unidos que fabrican este tipo de equipo, Heller-Aller Company en Napoleón, Ohio y Dempster Industries en Beatrice, Nebraska.

Los molinos de viento se fabrican en diversos tamaños, con diámetros de aspas de 6 a 14 pies, variando los precios, de acuerdo al tamaño, entre 700 y 1000 dólares, de todo el equipo.

Dempster fabrica un molino de viento con diámetro de aspas de 8 pies que va montado sobre una torre de 33 pies y que cuesta 839 dólares.

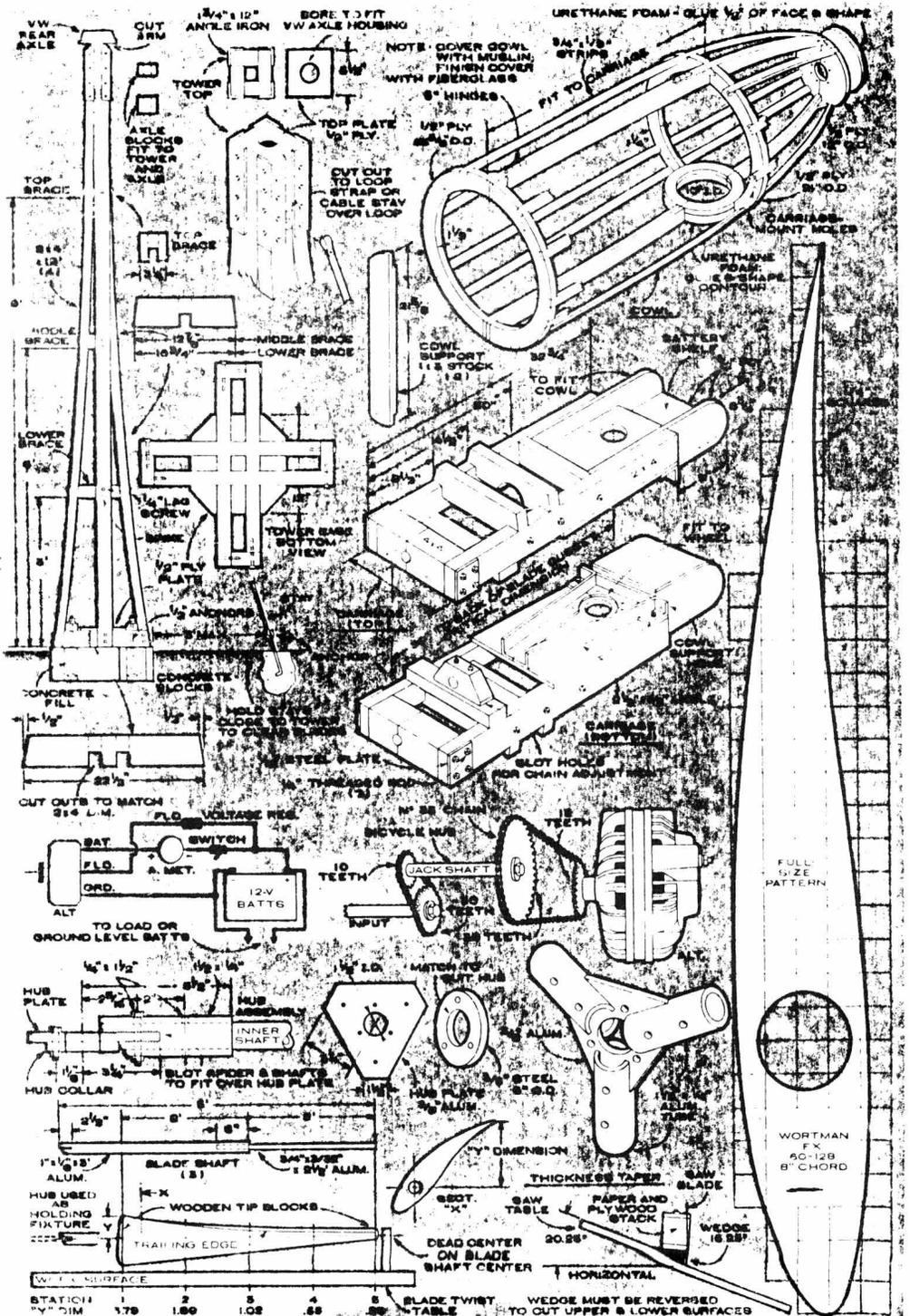


Fig. 2.3.a.

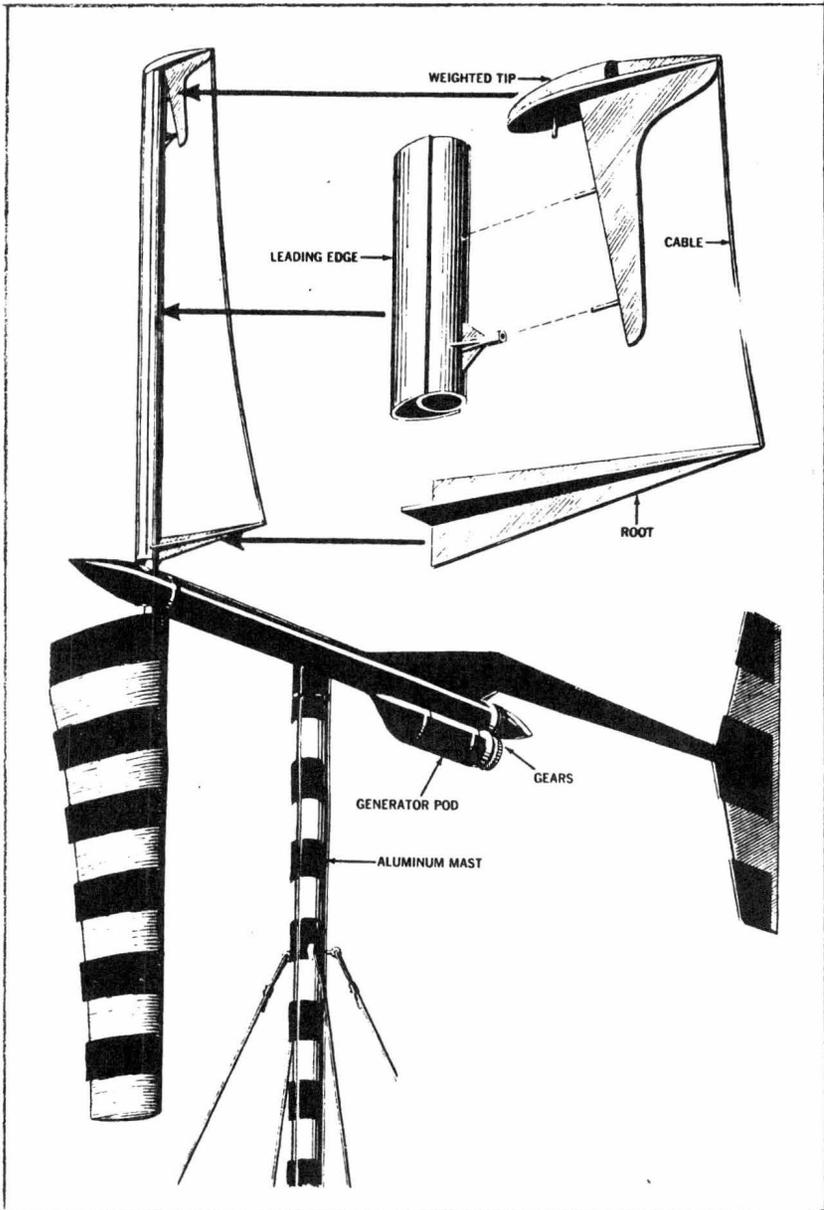


Fig.2.3.b.

Con cargo de transporte e instalado cuesta 1200 dólares.

2.3.2. Generadores Eléctricos de Viento.

Pequeños generadores eléctricos de viento, de 3 a 15 kW de salida, pueden usarse directamente para proporcionar energía eléctrica en una casa o vivienda. En combinación con colectores solares planos, que proporcionan energía, tanto para calentar el agua de servicio como para acondicionar la casa, a temperaturas bajas, un generador de viento podría suministrar electricidad para cubrir los requerimientos de energía a mayores temperaturas, proporcionando así autosuficiencia energética a una casa con consumo moderado.

Sin embargo, se tiene que hacer una inversión inicial considerable en el generador de viento, la torre y los acumuladores. Se tiene la ventaja de que este sistema no tiene costos de operación y apenas un mínimo de costos de mantenimiento, para una vida media útil de 30 a 35 años que presentan los equipos que fabrican actualmente.

Existen dos fabricas importantes que fabrican equipo para generadores de viento: Quirks en Sidney, Australia y Elektro GmbH en Winterthur, Suiza. En Estados Unidos se fundó en 1972 la Solar Wind Company, que actualmente se dedica a importar el equipo de las fabricas mencionadas, con miras a iniciar la producción de equipos propios en un futuro próximo, siguiendo la línea de la Jacobs Wind Electric Company, disuelta en 1957.

El precio, en dólares, de un generador de viento de la fábrica --

australiana, instalado en Norteamérica en 1972 fue de \$2790. Este precio - incluye:

-Aspas, carcaza, y alternador	
de 115 V, 2000 Watt	\$ 1475
-Torre de acero de 40 pies de altura	315
-Banco de 13 baterías con una capacidad	
de 130 amp/h, de fabricación australiana	475
	<hr/>
	\$ 2265
-Costos de transporte, instalación y otros	\$ 419
-Convertidor rotatorio de CA a CC	100
-Rectificador y accesorios	106

El precio de los equipos suizos es de 575 dólares por un generador de 300 Watt y 1785 dólares por uno de 6000 Watt.

La compañía americana distribuye también convertidores de frecuencia electrónicos, aparatos modernos de alta eficiencia que operan en el estado sólido, torres de diversos tamaños y los acumuladores de fabricación australiana para uso en plantas de viento.

En México no se tiene aún producción ni importación de este tipo de equipo, ni tampoco se tiene conocimiento oficial de su uso. Debido a la gran extensión del país, existen muchas regiones apropiadas para hacer uso del viento a cualquier escala. En la Ciudad de México no se tienen condiciones favorables de viento, siendo la velocidad máxima medida de 3.5 m/s.

B I B L I O G R A F I A

- H. C. HOTTEL AND J. B. HOWARD, New Energy Technology - -
Some Facts and Assessments, -
M. I. T. Press, Cambridge, -
1971.
- TIMOTHY J. HEALY, Energy Electric Power and --
Man, Boyd and Fraser Publishing
Company, 1974.
- H. E. VOEGELI AND J.J. TARRANT, Survival 2001, Van Nostrand-
Reinhold Company, 1976.
- WILSON CLARK, Energy for Survival, The Al-
ternative to Extinction, Anchor
Press/Doubleday Garden City,
New York, 1975
- BEN KOCIVAR, World's Biggest Windmill, Po-
pular Science, March 1976 --
Pag. 73.