



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

INSTITUTO DE INGENIERIA

TITULO

RADIADOR NOCTURNO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO

PRESENTAN:

**CANTERO GARIBAY PABLO
GUTIÉRREZ GONZÁLEZ GERARDO FABIÁN
SANDOVAL LUNA GERZAÍN RUFFO**



DIRECTOR DE TESIS:

**DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS
MTRO. NORBERTO CHARGOY DEL VALLE**

MEXICO, D.F

2008

AGRADECIMIENTOS:

A NUESTRA MÁXIMA CASA DE ESTUDIOS:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

A NUESTRA FACULTAD:

FACULTAD DE INGENIERÍA

A LOS PROFESORES:

**JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS
NORBERTO CHARGOY DEL VALLE**

Pablo Cantero Garibay

Agradezco:

A mis padres:

Martha y Pedro, quienes me dieron la vida y debo mi formación y mil cosas más...siempre los tengo presentes...

A mis hermanos:

Martha, Georgina, Claudia y Pedro por enseñarme durante todo este tiempo...sepan que eternamente los querré...

A mis amigos:

Que son la segunda familia que tengo y aunque no los vea, los recuerdo con mucho cariño...

A mis profesores:

*Por todo lo que me enseñaron y aprendí de ellos...
"el que enseña, aprende dos veces"*

"Lo imposible, hazlo posible, lo posible fácil y lo fácil elegante..."

Gerardo Fabián Gutiérrez González

Agradezco:

AL Dr. José Luis Fernandez Zayas, director de esta tesis, por su magistral dirección sin la cual no hubiera sido posible la realización de esta tesis.

AL Ing. Norberto Chargoy del Valle por su apoyo incondicional en la realización de esta tesis.

A mis padres Elisa y José, de todo corazón, por su amor, cariño, comprensión y apoyo. En todo momento los llevo conmigo.

Agradezco a mi esposa Lizbeth por haber encontrado el amor y compartir mi existencia con ella, gracias por tu apoyo en todo momento de mi vida.

Agradezco a mis hijos por todo el amor que de ellos recibo.

A mis hermanos Brenda, Alejandro y Daphne por la compañía y el apoyo que me brindan. Se que cuento con ellos siempre.

Agradezco a mi abuelita Guadalupe por encomendarme siempre con Dios para que saliera adelante.

Agradezco a mis maestros por su disposición y ayuda brindadas.

Por último agradezco a Dios por llenar mi vida de dichas y bendiciones

Gerzaín Ruffo Sandoval Luna

Agradezco:

A mis Padres

Porque gracias a su cariño y apoyo he llegado a realizar uno de mis anhelos más grandes, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mi se depositó y con los cuales eh logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado mas grande que pudiera recibir y por los cuales les viviré eternamente agradecido.

A mis tutores.

**DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS
MTRO. NORBERTO CHARGOY DEL VALLE**

Por su la confianza depositada para la realización de esta trabajo de investigación. Por la predisposición y orientación constante a resolver cualquier duda, además la paciencia que han mostrado el la continua labor de orientación en la dirección de esta tesis.

Y en especial a la Facultad de Ingeniería por darme las bases para ser una persona dispuesta a resolver problemas que aquejan a la sociedad.

OBJETIVO:

- **CONSTRUIR Y PROBAR UN DISPOSITIVO ENFRIADOR NOCTURNO DE AGUA EMPLEANDO EL MECANISMO TERMOSIFÓNICO.**

HIPÓTESIS:

- **OBTENER CON UN ARREGLO TERMOSIFÓNICO DE AGUA TEMPERATURAS MENORES QUE EL AMBIENTE, INCLUSIVE LOGRAR TEMPERATURAS DE CONGELAMIENTO.**

ÍNDICE TEMÁTICO

OBJETIVO	6
HIPÓTESIS	6
CAPITULO 1: Antecedentes	9
CAPITULO 2: Historia de la energía con el hombre	11
CAPITULO 3: Clasificación de energía	13
3.1 Energía no renovable	13
3.2 Energía renovable	14
3.2.1 Energía de las mareas	14
3.2.2 Energía eólica	14
3.2.3 Energía de la biomasa	15
3.2.4 Energía de las olas	15
3.2.5 Energía hidráulica	15
3.2.6 Energía solar	15
CAPITULO 4: Dispositivos solares de calentamiento	17
4.1 Tipos de dispositivos	17
4.1.1 Dispositivos de alta temperatura	17
4.1.2 Dispositivos de media temperatura	19
4.1.3 Dispositivos de baja temperatura	20
4.2 Características del colector de placa plana	20
4.2.1 Funcionamiento	21

CAPITULO 5: Termosifón	23
CAPITULO 6: Transferencia de calor	25
6.1 Conducción	26
6.2 Convección	28
6.3 Radiación	30
6.3.1 Radiación nocturna	32
CAPITULO 7: Desarrollo	33
7.1 Descripción del sistema	33
7.1.1 Características generales	33
7.1.2 Conexiones	35
7.2 Preparación del sistema	36
7.3 Periodos de estudio y resultados	36
7.3.1 Primer Periodo	37
7.3.2 Segundo Periodo	39
7.3.3 Tercer Periodo	41
7.3.4 Cuarto Periodo	42
7.3.5 Quinto Periodo	44
CAPITULO 8: Conclusiones y recomendaciones	46
BIBLIOGRAFÍA.	48
ANEXOS.	50

1. ANTECEDENTES.

Uno de los principales problemas en ciudades con desarrollo industrial es la contaminación, provocada por el uso intensivo de recursos energéticos fósiles (recursos no renovables), causando importantes alteraciones irreversibles en el planeta.

Para ir disminuyendo estas alteraciones al planeta se deben considerar a las energías renovables, pues como se sabe, las reservas de la principal fuente de energía no renovable (petróleo y sus derivados) están disminuyendo. Por esto es de vital importancia mirar a las energías renovables como el principal sistema de energía del futuro; Afortunadamente, México tiene una gran abundancia de este tipo de energía en todo su territorio nacional.

Existen varias definiciones acerca de lo que es un sistema pasivo, pues algunas de sus principales aplicaciones son la refrigeración y el calentamiento.

Ejemplos de estos sistemas son los destiladores solares de agua de mar, pues con ellos se obtiene agua fresca económica a partir de agua salada. Este sistema opera todo el día, inclusive cuando ya no se tenga radiación solar (al inicio de la noche).

En sí, el término pasivo se empezó aplicar hace unos cuantos años a aquellos sistemas de climatización ambiental que, en contraste con los complejos y sofisticados equipos de aire acondicionado o calefacción modernos, resultaban muy simples, tanto en concepto como en funcionamiento y mantenimiento; de hecho se trata que sean lo menos dependientes posible de equipos auxiliares convencionales de apoyo (bombas, ventiladores, motores), siendo, en la mayoría de los casos, totalmente independientes de éstos.

Finalmente se busca que los sistemas de climatización se caractericen por la nula dependencia de energéticos convencionales, como los de origen fósil, contribuyendo de manera contundente al ahorro y uso eficiente de los recursos no renovables.

El tema que se explorará en este trabajo de tesis será el que respecta al enfriamiento, debido a que en nuestro país ya se busca la obtención de equipos de aire acondicionado con mejores eficiencias, y con esto, menores consumos de electricidad, lo que conlleva, a ahorros a los consumidores. Pero aunque fuesen muy eficientes estos equipos, siempre necesitarán de una fuente primaria de energía para lograr enfriar el aire o fluido de trabajo tal como la electricidad¹.

¹ En el 2004 se contaba con una capacidad instalada de 46,171TonMW, de los cuales solo 10,475MW provienen de energías renovables (hidráulica, eólica y geotérmica), el resto con la aplicación de energías no renovables (combustible, carbón, gas natural).

Existen diversas publicaciones donde se estudian sistemas de enfriamiento, como los sistemas por absorción (comúnmente llamados refrigeradores solares), los cuales funcionan mediante un concentrador expuesto al sol; su fluido de trabajo es agua con alguna otra sustancia absorbidora (amoníaco, zeolita, carbón activado, metanol, etc.), la cual tiene la función de condensarse y disponerse como refrigerante mediante condensadores y evaporizadores (ANES 1997, E. Torres E., M. Picon Núñez, J. J. Navarrete).

Otro sistema de refrigeración es el logrado mediante tubos de calor. Este sistema consta de tubos de vidrio sellados en sus extremos, en su interior se produce un vacío parcial y se introduce una cierta cantidad de fluido refrigerante previo al sellado. El funcionamiento de cada tubo es simple: una vez que se ha colocado uno de sus extremos en la fuente y el otro en el receptor de calor, el fluido de trabajo se evapora en la zona caliente, viaja del extremo de mayor al de menor temperatura y se condensa en el extremo opuesto, liberando la energía térmica que había recibido. El ciclo se completa por gravedad al regresar el fluido en estado líquido a su punto de partida. El proceso continúa mientras exista la diferencia de temperaturas entre las zonas en cuestión, sin que se requiera la intervención de bomba, soplador o compresor alguno.

Una alternativa más, es la basada en la radiación nocturna, la cual se tratará como tema principal de esta tesis en los capítulos subsecuentes.

Una base fundamental para este trabajo se encuentra en los estudios realizados por Erico Frigerio, donde sus principales aportaciones sobre este tipo de energía se encuentran en la revista ASADES. Este tipo de energía (energía pasiva) se entiende por energía que no proviene del sol (radiación nocturna).

Como se mencionó anteriormente, la humanidad se volvió dependiente de los hidrocarburos y los consume de manera excesiva, lo que provoca daños irreversibles al medio ambiente (calentamiento global, lluvia ácida, deterioro en la capa atmosférica, etc.), así que es imprescindible desarrollar fuentes alternativas de energía para seguir satisfaciendo, en lo posible, las necesidades que ahora atienden los hidrocarburos. Este tipo de fuentes alternativas las podemos encontrar en lo que llamamos energías renovables.

2. HISTORIA DE LA ENERGÍA CON EL HOMBRE.

El hombre y la energía siempre han estado relacionados estrechamente, y como consecuencia el trabajo se define como el producto de una fuerza aplicada a lo largo de una distancia. Se utiliza en una gran variedad de procesos, para levantar una masa en el campo gravitacional; para deformar un cuerpo, estirar una liga o un resorte o hacer fluir un líquido o gas. En la mayoría de los procesos industriales, para transformar materia prima en producto terminado. Por su parte, la energía es el trabajo entre la unidad del tiempo que se desempeña. Por tanto se requiere energía para el transporte de personas, de mercancías y hasta para tocar cualquier instrumento musical.

Calor y trabajo, son dos necesidades básicas en cualquier grupo humano, del nivel social, económico o tecnológico que se quiera. Para producirlos, el hombre ha utilizado, a lo largo de su historia, una gran variedad de recursos energéticos. Al principio de la era presente, por ejemplo, el calor -para calefacción, cocina, etc.- era producido en gran medida por medio de la combustión de leña, mientras que el trabajo en pequeña escala era producido por la fuerza humana; a mediana escala se obtenía de ciertos animales domesticables -caballos, burros, bueyes, etc.- y a gran escala podía extraerse, por ejemplo, del viento que se utilizaba para mover los grandes veleros mercantes y de guerra.

Las primeras máquinas térmicas de uso práctico aparecieron hacia finales del siglo XVII. En la segunda mitad del siglo XVIII, el escocés James Watt perfeccionó la máquina de vapor y con ello se facilitó la producción industrial de cantidades relativamente grandes de trabajo a partir de la combustión, primero de leña y después de carbón mineral. A principios del siglo XIX existían en Inglaterra y en Estados Unidos algunos barcos de vapor que efectuaban viajes comerciales. Antes del segundo tercio del mismo siglo, entró en servicio en Inglaterra el ferrocarril propulsado por una máquina de vapor.

Las máquinas de vapor eran de "combustión externa". Este concepto implica que la fuente de calor utilizada no es de gran importancia, siempre y cuando cumpla con ciertos requisitos de poder calorífico y de temperatura y sea capaz de producir el trabajo para la cual fue diseñada. Así, una máquina de vapor que puede funcionar con leña, también puede hacerlo con carbón, con petróleo o con ciertos residuos de basura.

Hacia mediados del siglo XIX se tuvieron los primeros motores de combustión interna. A diferencia de los de combustión externa, estos requieren un combustible muy específico para funcionar. Con el tiempo, debido a razones técnicas y económicas, los motores de combustión interna, principalmente los de gasolina y diesel, se hicieron cada vez más seguros, confiables, económicos y por tanto, abundantes. Aparecieron también otras máquinas térmicas, como las turbinas y los motores a reacción, que también consumen combustibles muy

específicos. Así fue como la sociedad al paso del tiempo se hizo dependiente de los combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles comprenden principalmente el petróleo y sus derivados (gasolinas, diesel, turbosina, etc.), el gas natural y el carbón mineral. Al principio de la explotación de estos recursos, se consideraban ilimitados y su impacto ambiental era despreciable. Sin embargo, debido al extraordinario crecimiento de la población mundial (y nacional), junto con el aumento en el consumo per cápita de estos recursos, sólo queda petróleo disponible para su explotación económica durante la primera mitad del siglo XXI¹, como se muestra en Anexo 1.

Los combustibles fósiles también son causantes de la llamada lluvia ácida, que en los bosques cercanos a las áreas altamente industrializadas está causando grandes daños al suelo, y por tanto a la flora y fauna. En las grandes ciudades, la combinación de las emisiones de gases de combustión, con algunos otros fenómenos naturales, como las inversiones térmicas, la humedad y la radiación solar produce efectos indeseables para la salud humana, por medio de la formación del humo niebla (smog), las altas concentraciones de ozono y, en general, la concentración de componentes indeseables en la atmósfera.

Tanto por razones económicas (debidas a la próxima escasez de hidrocarburos) como ecológicas (alteración de la atmósfera y el suelo), es de suma importancia el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean menos agresivas al ambiente.

Por todo lo anterior, para satisfacer las necesidades energéticas de la población, los países enfatizan cada día más la necesidad de hacer un uso racional de la energía surge también la necesidad práctica de ahorrar energía, adoptando esquemas de empleo racional y moderado. Aparecen también con gran vigor los sistemas pasivos, es decir, aquellos que funcionen sin requerimientos energéticos convencionales.

¹ ASPO, Boletín N° 57 - Septiembre 2005.

3. CLASIFICACIÓN DE ENERGÍA.

La energía es una magnitud física que asociamos con la capacidad que tienen algunas sustancias para producir trabajo mecánico, emitir luz, generar calor, etc. Para obtener energía se tendrá que emplear alguna sustancia que la tenga y pueda experimentar la necesaria transformación. A estas sustancias se les llama **fuentes de energía**.

De una forma más amplia se llama fuente de energía a todo fenómeno y sustancia natural, artificial o alojada en un yacimiento que puede suministrar energía. Las cantidades disponibles de energía de estas fuentes, es lo que se conoce como **recurso energético**. La Tierra posee cantidades enormes de estos recursos. Sin embargo uno de los problemas que tiene planteada la humanidad es la obtención y transformación de los mismos.

En la actualidad se cuenta con dos fuentes principales de energía: no renovables y renovables.

3.1 ENERGÍA NO RENOVABLE.

Se llama Energía no renovable a las fuentes de energía que existen en una cantidad limitada, y que una vez empleada en su totalidad no puede sustituirse. Esto ocurre cuando ya no existe el sistema apropiado de producción o la producción es demasiado pequeña para resultar útil.

Fuentes de energía no renovable son:

Energía no renovable	{	- Carbón
		- Petróleo
		- Gas Natural
		- Nuclear

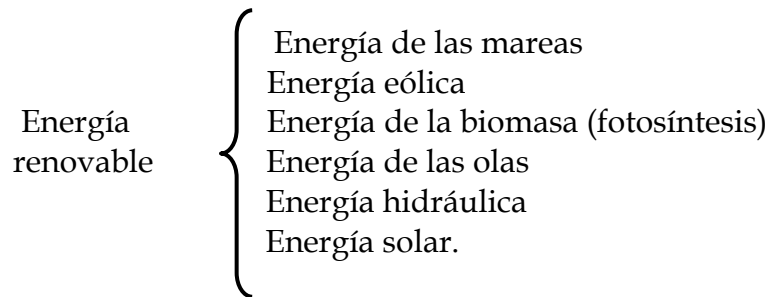
Como se menciono anteriormente, la humanidad se volvió dependiente de los hidrocarburos (petróleo y sus derivados); como consecuencia del uso excesivo de estos, se causan daños irreversibles al medio ambiente (calentamiento global, lluvia ácida, deterioro en la capa atmosférica, etc.), por lo que es imprescindible buscar fuentes alternativas de energía para seguir

satisfaciendo (o en lo más posible), las necesidades que atienden los hidrocarburos. Este tipo de fuentes alternativas las han llamado energías renovables.

3.2 ENERGÍA RENOVABLE.

Se llama energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, es decir, su cantidad disponible (en la tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. Para tener un esquema de desarrollo sustentable es indispensable que la mayoría de los recursos, y particularmente la energía, sean del tipo renovable.

Principales fuentes de energía renovable:



3.2.1 ENERGÍA DE LAS MAREAS.

En algunas regiones costeras presentan mareas especialmente altas y bajas. En estos lugares se ha propuesto construir grandes represas costeras que permitirían generar energía eléctrica con grandes volúmenes de agua aunque con pequeñas diferencias de altura. Este tipo de energía es como la energía hidráulica, pero su origen es la atracción gravitacional del sol y principalmente de la luna, en vez del ciclo hidrológico. En México, en general, este recurso es abundante específicamente en el Mar de Cortés y diversos puntos costeros del océano pacífico.

3.2.2 ENERGÍA EÓLICA.

La energía eólica es la que se aprovecha del viento. Las aplicaciones más comunes son: transporte (veleros), generación eléctrica (aerogeneradores) y bombeo de agua. En México hay regiones en donde la energía eólica es muy abundante: principalmente las costas, el Istmo de Tehuantepec, en Baja California y en diversas regiones del centro y norte del país.

3.2.3 *ENERGÍA DE LA BIOMASA (fotosíntesis).*

La forma más antigua de aprovechamiento de la energía solar, inventada por la naturaleza misma, es la fotosíntesis. Mediante este proceso las plantas elaboran su propio alimento (su fuente de energía) y el de otros seres vivos en las cadenas alimenticias. También mediante fotosíntesis se obtienen otros productos, como la madera, que tienen muchas aplicaciones, además de su valor energético. A partir de la fotosíntesis puede utilizarse la energía solar para producir sustancias con alto contenido energético (liberable mediante una combustión) como el alcohol y el metano.

3.2.4 *ENERGÍA DE LAS OLAS.*

También se ha propuesto aprovechar, en ciertos lugares privilegiados, el vaivén de las olas del mar para generar energía eléctrica. Las olas son, a su vez, producidas por el efecto del viento sobre el agua. Por tanto, también es una forma derivada de la energía solar.

3.2.5 *ENERGÍA HIDRÁULICA.*

La energía hidráulica es la que se obtiene a partir de caídas de agua, artificiales o naturales. Típicamente se construyen presas en los lugares con una combinación de gasto anual de agua y condiciones orográficas adecuadas. Estrictamente, también esta es una forma derivada de la energía solar, porque el Sol provee la energía impulsora del ciclo hidrológico. Sin embargo, tradicionalmente se ha considerado como una forma de energía aparte. México tiene condiciones orográficas muy adecuadas pero, a excepción de la región sureste, la precipitación pluvial no es abundante.

3.2.6 *ENERGÍA SOLAR.*

De la enorme cantidad de energía que emite constantemente el sol, una parte llega a la atmósfera terrestre en forma de radiación solar. De ella, un tercio es enviada de nuevo al espacio a consecuencia de los procesos de refracción y reflexión que tienen lugar en la atmósfera de la Tierra. De los dos tercios restantes, una parte es absorbida por las distintas capas atmosféricas que rodean el globo terráqueo. El resto llega efectivamente a la superficie de la Tierra por dos vías: directamente, es decir, incidiendo sobre los objetivos iluminados por el Sol; e indirectamente, como reflejo de la radiación solar que es absorbida por el polvo, las nubes y el aire. La primera recibe el nombre de radiación directa y a la segunda se le llama radiación difusa.

La energía emitida por el sol no llega a la tierra de manera uniforme. Varía según la hora del día, la inclinación estacional del globo terráqueo

respecto del sol, las distintas zonas de la superficie terrestre, etc., debido a los movimientos de la tierra y a la absorción de la radiación solar por parte de la atmósfera.

El sol es la principal fuente de energía. Ver anexo 2

La energía solar tiene infinidad de aplicaciones, tanto para la transformación de esta energía en trabajo, o bien, aprovechando directamente la energía que llega a la tierra en forma de radiación de onda corta para satisfacer algunas de las necesidades básicas, calefacción o circulación de agua a elevada temperatura "sistema térmico" y los "sistemas fotovoltaicos".

Se denomina "energía térmica" a la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas. El medio para conseguir este aporte de temperatura se hace por medio de colectores solares que pueden ser planos, tubulares y de concentración. La literatura correspondiente a estas aplicaciones es probablemente la más abundante de las relacionadas con fuentes renovables de energía.

Se llama "energía fotovoltaica" a la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz directamente en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

4. DISPOSITIVOS SOLARES DE CALENTAMIENTO.

Un dispositivo solar de calentamiento es un cambiador de calor, el cual convierte la radiación solar en energía calorífica y la transfiere a un fluido para conducirla fuera del dispositivo. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido de trabajo (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del sistema de calentamiento. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el sistema, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5 μm) y es por naturaleza variable con el tiempo.

4.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS.

Como ya mencionamos anteriormente, un dispositivo de calentamiento solar en realidad, lo que hace es sencillamente dejarse calentar por el sol y transmitir la energía térmica al fluido de trabajo y a su vez, hasta el almacenamiento de calor para su posterior utilización.

La primera cualidad que hay que exigir a cualquier tipo de aparato de calentamiento es su inalterabilidad durante un lapso prolongado de tiempo, como mínimo 20 años, sin pérdida sensible de sus propiedades y rendimiento.

Los dispositivos se pueden dividir en tres principales categorías dependiendo de la temperatura de trabajo:

- 1) Dispositivos de alta temperatura.**
- 2) Dispositivos de media temperatura.**
- 3) Dispositivos de baja temperatura.**

4.1.1 Dispositivos de alta temperatura.

Estos dispositivos se caracterizan por sus altas temperaturas de funcionamiento, lo cual se logra interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbedora y disminuyendo las áreas de pérdidas de calor.

En esta clasificación se encuentran básicamente tres diferentes dispositivos: los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central. Su característica principal es su alta temperatura de operación, pues operan a temperaturas superiores a los 500° C. Su principal aplicación es la producción de electricidad y transmitirla a la red eléctrica. En países como Israel, el 85% de la generación de electricidad es producida por energía solar. En Odeillo, en la parte francesa de los Pirineos, se

tienen instalados 9,600 reflectores que constan de un sistema de torre central y helióstatos, con una superficie total de unos 1,900 m² para producir temperaturas de hasta 4,000 °C.

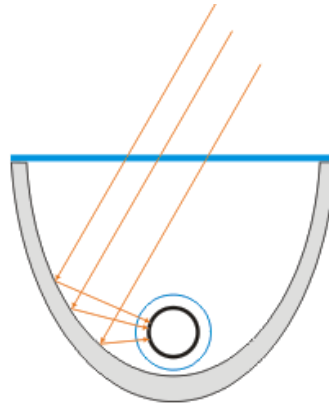


Fig. 1. Esquema de la nueva generación de canal parabólico.



Fig. 2. Arreglo de canales parabólicos.

La generación centralizada de electricidad a partir de energía solar está en desarrollo. En el concepto de torre central consiste en un gran número de espejos que se orientan automáticamente (helióstatos) para reflejar los rayos solares concentrándolos en un absorbedor colocado sobre una torre a una altura aproximada de 60 a 100 m, que los convierte en energía calorífica. El vapor generado puede usarse en los ciclos convencionales de las plantas de energía y generar electricidad.



Fig. 3. Plataforma Solar de Almería, CRS (tipo torre central).

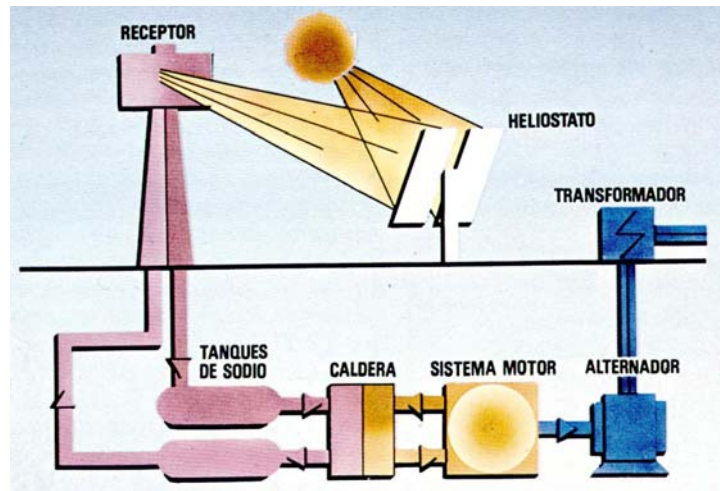


Fig. 4. Esquema de una Central Eléctrica Solar con Helióstatos

4.1.2 Dispositivos de media temperatura.

Son dispositivos que concentran la radiación solar para entregar temperaturas en el rango comprendido entre los 100 y 500° C. Entre estas temperaturas encontramos a los colectores de vacío, concentradores estacionarios y a los canales parabólicos. En el colector de vacío se encuentra un absorbedor encargado de captar la energía del sol y transferirla al fluido de transporte, mientras que en los concentradores estacionarios y parabólicos, la concentración se realiza mediante espejos dirigidos hacia un tubo receptor

absorbedor, colocado a lo largo del concentrador, coincidiendo con el foco de las parábolas. Cuanto más pequeño sea el ángulo de aceptación mayor será la concentración y viceversa.

Nota: Los dispositivos de alta y media temperatura están restringidos a zonas de alta insolación debido a que trabajan con la componente directa de la radiación solar.

4.1.3 Dispositivos de baja temperatura.

Por último se describen los dispositivos de baja temperatura. Su característica principal es la entrega del fluido a temperaturas menores a 100°C. Sus principales aplicaciones se ven reflejadas en el calentamiento de piscinas, agua para uso doméstico y en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el calor de proceso no es mayor a 100°C, por ejemplo varios procesos de pasteurización, el lavado textil, destilación del agua, entre otras. Aunque también en comunidades rurales es utilizado para secar productos agropecuarios como fruta y granos mediante el calentamiento de aire (Torres et al.).

El colector solar plano es el aparato más representativo de la tecnología solar fototérmica de baja temperatura. Está constituido básicamente por:

- 1.- Marco de aluminio.
- 2.- Cubierta(s) de vidrio templado con bajo contenido en hierro.
- 3.- Placa absorbadora, arreglo de tubos con aletas de cobre de color negro.
- 4.- Cabezales de alimentación y descarga de agua.
- 5.- Aislante, usualmente fibra de vidrio, poliestireno o unicel.
- 6.- Caja del colector, galvanizada o de aluminio.

Debido a que la realización de este trabajo de tesis está basado en un colector solar de placa plana, se analizan a continuación sus características.

4.2 CARACTERISTICAS DEL COLECTOR SOLAR PLANO.

Los colectores solares planos como el mostrado en la figura 5, son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas.

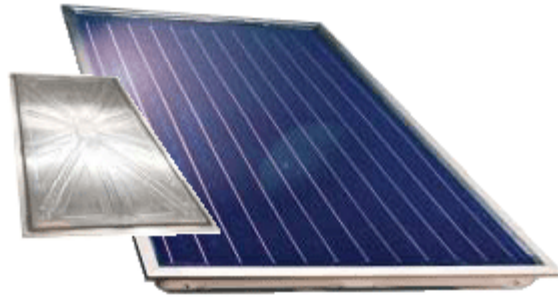


Fig. 5. Colector solar plano

Pueden ser divididos en dos categorías básicas: los que utilizan como fluido de trabajo un líquido (generalmente agua) y los que utilizan un gas (aire, casi siempre). Cuando el fluido es aire, generalmente manejan flujos más grandes comparado con los que calientan agua. Cuando se trabaja con un líquido, este fluye normalmente por un tubo adherido a una lámina de metal, normalmente cobre; mientras que cuando se utiliza un gas, este fluye por un ducto que forma parte de la placa de absorción y que además puede tener muy diversas formas.

Los colectores solares funcionan mediante el mecanismo de termosifón, es decir, mediante la circulación que resulta de la diferencia de temperaturas y por consiguiente, a la variación de su densidad. (ver cap. 5. Termosifón)

4.2.1 FUNCIONAMIENTO.

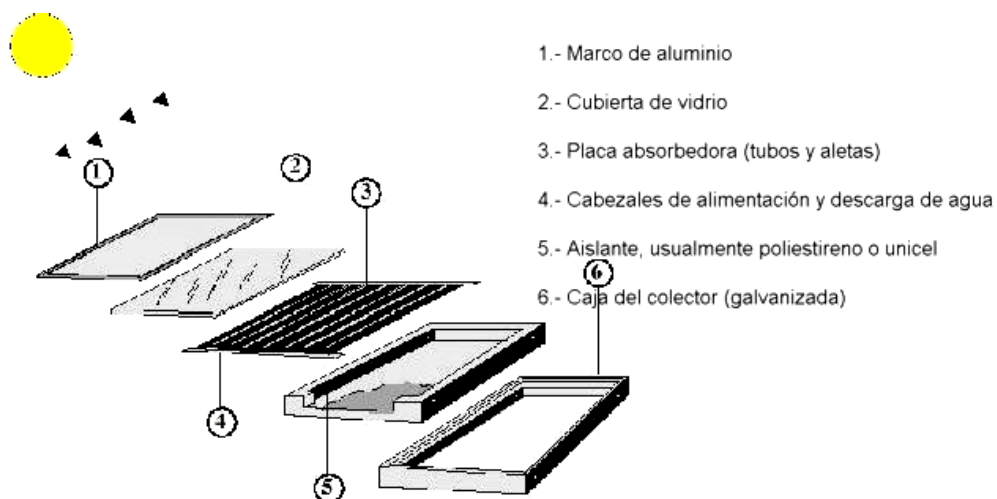


Fig. 6. Partes de un colector solar plano

Un colector solar funciona de la siguiente manera: la energía solar incidente atraviesa una o varias capas de vidrio o algún otro material transparente adecuado, antes de alcanzar la placa absorbadora de color negro, que es el

elemento más importante del colector solar para poder absorber la energía del sol.

Esta puede tener un tratamiento térmico selectivo, al cual están unidos los tubos o ductos con aletas. En esta placa es donde la energía radiante es convertida en energía calorífica. Para mejorar el rendimiento del panel se usan ocasionalmente pinturas especiales selectivas, como el níquel negro (desarrollado por un prestigioso físico israelí, el doctor Tabor) o el cromo negro (recubrimiento del panel solar utilizado en los experimentos de este trabajo de tesis). Sus características principales son:

- **Níquel negro:** Aplicado sobre una superficie de acero con un determinado contenido de níquel y azufre. Posee muy buenas características de absorción (0.96) y emitancia (0.07), y es ideal para su uso en climas secos.
- **Cromo negro:** Aplicado sobre una superficie de óxido de cobre o nitrato de cobre, se hace el cromado sobre una capa previa de niquelado. Las características son: absorción = 0.95 y emitancia = 0.10 a 0,15.

La energía térmica así capturada se transfiere por conducción hacia el fluido, que generalmente es agua, y es quien finalmente remueve la energía térmica del colector y la transfiere al tanque de almacenamiento térmico o al espacio o producto que va a ser calentado, según el tipo de aplicación. El vidrio o su equivalente, además de permitir la entrada de la radiación solar a la placa de absorción, minimiza las pérdidas de calor por radiación infrarroja y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del colector y permite el efecto invernadero (evitar que salgan los rayos solares).

El aislante térmico (espuma de poliuretano, poliestireno, lana mineral, fibra de vidrio o algún otro) se coloca en la parte posterior y en lados del colector, para disminuir las pérdidas de calor hacia el medio ambiente. Todas estas partes se encuentran dentro de una caja protectora que sirve como estructura del colector y esta hecha de diversos materiales como lámina metálica galvanizada, aluminio o acero inoxidable, según el fabricante y el precio.

5. TERMOSIFÓN.

El mecanismo de convección natural por el cual funciona un colector solar es el llamado termosifón. El termosifón se genera a partir de un gradiente de temperatura, en donde el fluido empleado (para el caso aquí analizado es agua simple) que está más caliente por estar expuesto al calentamiento de la radiación solar, presenta menor densidad que el fluido que está más frío. Esta diferencia de densidades ocasiona que se genere la circulación del fluido; el fluido menos denso, más ligero, tiende a ocupar los lugares más elevados del sistema, y por lo mismo, el fluido más denso, más pesado tenderá a ocupar los lugares más bajos.

La densidad esta representada por la letra griega ρ "rho" y es la relación de su masa m por unidad de volumen " v ":

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Las unidades de la densidad, por tanto, son kilogramo por metro cúbico (kg/m^3) en el Sistema Internacional de Unidades.

El aumento de temperatura produce una dilatación ocasionando un aumento de volumen, tanto en sustancias sólidas como en líquidas; se puede demostrar experimentalmente que, si la variación de temperatura ΔT no es demasiado grande, el aumento de volumen ΔV es, aproximadamente, linealmente proporcional a la variación de temperatura. Sin embargo, en los gases no se presenta el mismo comportamiento. La densidad de un gas depende fuertemente de la presión y temperatura. Un ejemplo claro de este fenómeno es el presentado en globos aerostáticos. En estos aparatos una variación en la temperatura del aire ocasiona un cambio de su densidad, así el fluido más denso y frío ejerce una fuerza de flotación hacia arriba sobre el fluido más caliente, debido a que el aire más frío y denso se asienta en la parte inferior y hace que el aire más caliente y menos denso suba a la parte alta del globo. A medida que el fluido caliente es empujado hacia arriba, el fluido más frío es desplazado del globo. A su vez, este fluido más frío que rodea al globo por fuera lo empuja hacia arriba, por tanto se establece un movimiento de flujo continuo en tanto la diferencia de temperaturas prevalezca.

Sin embargo, el agua presenta un comportamiento distinto al de los gases, pues esencialmente incompresible.

El agua, como se muestra en la figura 7, en el intervalo de interés desde una temperatura ambiente (mayor a $15\text{ }^\circ\text{C}$), hacia los $4\text{ }^\circ\text{C}$, presenta un aumento de densidad, el volumen disminuye, (a los $4\text{ }^\circ\text{C}$ su densidad es máxima, como se muestra en el gráfica). Sin embargo, a la temperatura comprendida entre $4\text{ }^\circ\text{C}$ y $0\text{ }^\circ\text{C}$, la densidad disminuye y aumenta el volumen con disminución de la temperatura; comportamiento opuesto al de mayor parte de las sustancias.

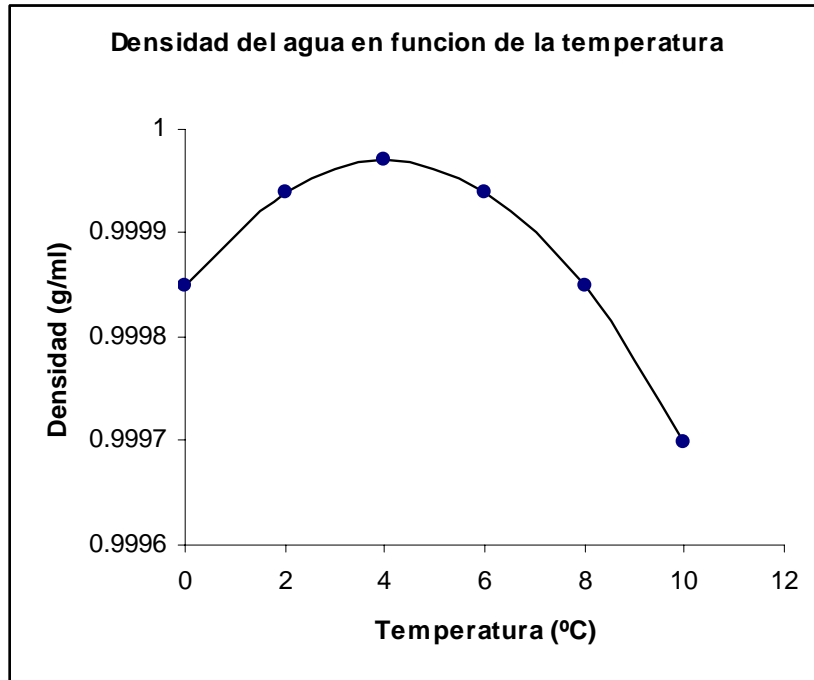


Fig. 7. Densidad del agua en función de la temperatura

Este comportamiento tiene un efecto importante en la vida vegetal y animal de los lagos. Cuando un lago se enfría, el agua fría de la superficie desciende al fondo a causa de su mayor densidad. Pero cuando la temperatura alcanza los 4°C, este movimiento cesa y el agua próxima a la superficie está más fría (y es menos densa) que la del fondo. En el anexo 3 se explica ¿por qué el hielo flota?

Hasta este punto de la tesis se ha mencionado a calor y trabajo como necesidades básicas del hombre. En este capítulo se explican los procesos físicos que sirven de base a los mecanismos de transferencia de calor mediante las interacciones de un sistema con su alrededor.

La forma de energía que se transfiere debido a una diferencia de temperatura entre los sistemas se denomina calor. Al calentarse un cuerpo, aumenta la energía cinética de las moléculas, produciéndose choques más o menos violentos, que se manifiestan en un aumento de temperatura.

La energía no se transfiere de un sistema de temperatura baja a otro de temperatura más alta. Para que la energía se transfiera de una temperatura baja a una más alta es necesario realizar trabajo.

La cantidad de calor contenida en un cuerpo, es función de su masa y de su temperatura. La cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de sustancia para que eleve su temperatura en un grado es llamado calor específico "c". En el caso particular del agua "c" es igual a 4186 J/(kg K). Una forma común de escribir la primera ley de la termodinámica es:

$$c = \frac{q}{m * \Delta T}$$

Donde:

c es el calor específico, J/(kg K)

q es la cantidad de calor, J

m la masa, kg

ΔT la diferencia entre las temperaturas inicial y final, K

Adicionalmente $q = dU + W$; dada una cantidad de energía térmica o calor (q) que fluye dentro de un sistema, ésta debe aparecer como un incremento de la energía interna del sistema (dU) o como un trabajo (W) efectuado por el sistema sobre su entorno.

Por lo tanto, se puede decir que el calor específico es una medida de la capacidad del material para almacenar calor.

6. TRANSFERENCIA DE CALOR.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas en dirección de la temperatura más baja; es decir, la transferencia de calor es definida como la transmisión de energía de una región a otra, resultado de la diferencia de temperatura existente entre ellas.

Existen tres mecanismos o procesos fundamentales de transmisión de energía: conducción, convección y radiación. Sin embargo, en la realidad, la forma en que se distribuye la temperatura en un medio determinado se controla

por efectos combinados de estas tres formas de transferencia de calor. Por esto, no es posible aislar por completo un mecanismo de los otros dos. A continuación se mencionan cada uno de ellos.

6.1 CONDUCCIÓN.

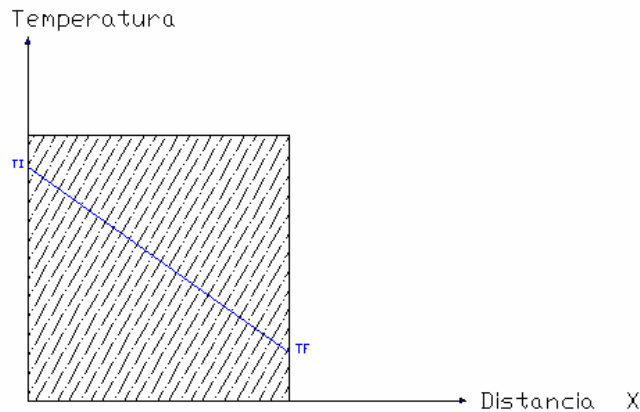
La conducción es un proceso mediante el cual el calor fluye desde una región de temperatura alta (más energética) a una región de temperatura baja (menos energética) dentro de un medio ya sea sólido, líquido, gaseoso, o entre distintos medios en contacto físico directo, típicamente en sólidos. La energía calorífica se transfiere por la agitación molecular provocada por el calor que se transmite progresivamente, sin modificar la distancia relativa de las moléculas. Esto es, las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan, ya sea por choques elásticos (en fluidos) o por difusión de los electrones de alta a baja temperatura (en metales), debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas, por conducción de calor, hasta que exista equilibrio térmico, o sea, que las temperaturas se uniformen.

La relación básica para este mecanismo físico se le conoce con el nombre del físico matemático francés Joseph Fourier, quien establece en 1822 que la rapidez del flujo de calor por conducción en una dirección dada en un material es igual al producto de la conductividad térmica del material por el área de la sección transversal, por la cual fluye el calor, y por el gradiente de temperatura en esa dirección.

$$q'' = -kA \frac{dT}{dx} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Donde q'' es el flujo de calor o transferencia de calor, W, A es el área de la sección, m^2 , y k (conductividad térmica), $\left[\frac{W}{mK} \right]$.

El signo negativo “-”, es por convención y especifica que la dirección en que crece la distancia “x”, es la dirección en que crece el flujo del calor positivo, como se muestra en la siguiente figura.



Cuando la temperatura se distribuye linealmente, se dice que hay “estado permanente”, y el gradiente se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{TF - TI}{L}$$

quedando:

$$q'' = k \frac{TF - TI}{L}$$

En la tabla se muestran algunos valores típicos de k .

Tabla 1. Valores típicos de k .

Material	k [W/(m K)]
Plata	420
Cobre	400
Aluminio	240
Acero	79
Hielo	1,7
Vidrio. Hormigón	0,8
Agua	0,59
Músculo animal. Grasa	0,2
Madera. Asbestos	0,08
Fieltro. Lana mineral	0,04
Aire	0,024
Vello	0,019

La conductividad térmica, k , es una propiedad del material e indica la capacidad del material para conducir el calor, o visto de otra manera, es la velocidad con que el material deja pasar el calor por conducción. En la mayoría de los metales puros la conductividad térmica es alta, mientras que en los gases y materiales aislantes dicha conductividad baja. Cabe mencionar que los materiales con alta conductividad térmica se denominan conductores, mientras los de baja conductividad se denominan aislantes térmicos.

La conducción es también importante en los fluidos, pero en medios no sólidos está generalmente combinada con la convección, y en algunos casos, también con la radiación.

6.2 CONVECCIÓN.

Este mecanismo de transferencia de calor se caracteriza por transferir energía calorífica mediante el desplazamiento de materia entre regiones con diferentes temperaturas. La convección es propia de los fluidos y tiene gran importancia entre una superficie sólida y un líquido o gas. En ausencia de dicho movimiento la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente ocurre por conducción pura. La transferencia de calor de este mecanismo se realiza de la siguiente manera:

Comienza el calor fluyendo por conducción de la superficie a las partículas adyacentes del fluido, incrementando su temperatura y provocando movimiento -debido a la disminución de densidad- hacia el fluido de baja temperatura, donde las partículas se mezclan y transfieren parte de la energía que almacenan transportada por el movimiento de la mezcla.

La transferencia de calor por convección se clasifica por la forma de inducir el flujo; esta puede ser por convección libre o natural y por convección forzada.

La convección libre es debida a la diferencia de densidades resultado del incremento de temperatura. Un ejemplo de este movimiento se aprecia en el calentamiento del agua en un recipiente antes de sufrir la ebullición o el enfriamiento de un equipo eléctrico. La naturaleza abunda en ejemplos de flujo de convección natural

Por otra parte, cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o un agitador, el proceso se conoce como convección forzada. El radiador en un sistema de enfriamiento de un automóvil es un ejemplo típico de convección forzada.

La eficiencia del proceso depende del movimiento y tipo del fluido. Para facilitar el estudio se debe saber si el proceso es estable (no variable en el tiempo) o si es transitorio o inestable (variable en el tiempo). El estado inestable existe cuando el sistema está sujeto a variaciones de temperatura en los alrededores.

La relación para representar este fenómeno de transporte de energía se describe por la "ley de enfriamiento de Newton". Para ilustrar esta formulación consideremos la siguiente figura 8.

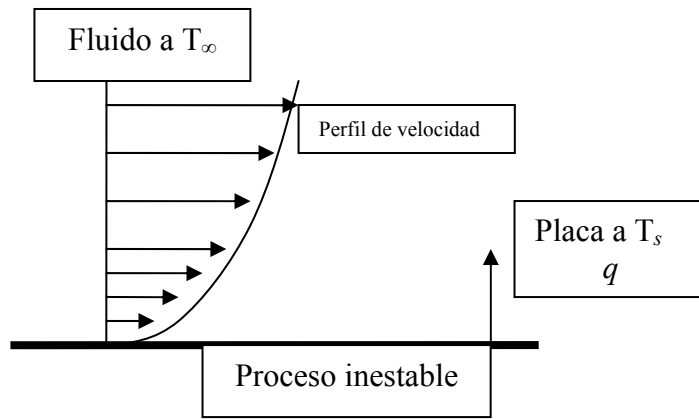


Fig. 8. Perfil de velocidad en una placa

Si se considera una placa con una temperatura T_s , la cual disipa el calor hacia un fluido cuya temperatura es $T_\infty < T_s$, entonces la transferencia de calor de la pared hacia el fluido queda representada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

Donde:

q'' es el flujo de calor por unidad de área en la pared, en $[W/m^2]$

Las temperaturas T_∞ y T_s en $[K]$

T_∞ es la temperatura del fluido

T_s es la temperatura de la placa.

h es el coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de película

El coeficiente de transferencia de calor h , depende de varios factores. Entre otros, depende fuertemente de la geometría del sistema, además de las propiedades físicas del flujo y del fluido. Para formas geométricas muy simples puede determinarse analíticamente, sin embargo, para geometrías complejas y realistas solo queda el camino experimental. Actualmente algunos autores han compilado tablas con valores típicos de h .

Tabla 2. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor “h” por convección¹

Proceso	<i>h</i> (W/m² K)
Convección Libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección Forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20,000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100,000

6.3 RADIACIÓN.

La energía del sol llega a la tierra mediante grandes cantidades de ondas de luz visible, así como de cantidades considerables de ondas de los rangos infrarrojo y ultravioleta, desplazadas a través del espacio, todas pertenecientes a una clase de ondas, llamadas ondas electromagnéticas. La gente que se expone al sol siente calor debido a que su cuerpo absorbe energía de las ondas electromagnéticas del sol. Si se pone la mano cerca de un foco o cerca del fuego sentirá un efecto semejante.

El proceso de transferir energía de un material -sólido, líquido o gas- mediante ondas electromagnéticas se denomina radiación y, a diferencia de los procesos de convección o conducción, no requiere un medio material para su transportación y se transmite a través del vacío lo mismo que a través del aire. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, es un fenómeno semejante a la luz y viaja igual que ésta, a 300,000 Km/s.

Todos los cuerpos emiten calor radiante dependiendo de la temperatura y naturaleza de la superficie. Cualquier cuerpo absorbe y por encima del 0 absoluto (-273°C), emite radiación térmica. La radiación térmica suele corresponder a la banda de frecuencias del infrarrojo. No se concibe circunstancia ninguna en que una sustancia pudiese estar a temperatura del 0K, ni se ha medido tal ocurrencia en ningún momento.

¹ Fundamentos de Transferencia de Calor, cuarta edición. Frank P. Incropera pag. 8.

El cuerpo negro es un cuerpo ideal que emite y absorbe el máximo de calor por radiación, sin restricciones debidas a la superficie. Por ello, cuando un cuerpo está constituido por superficies oscuras, emite y absorbe calor por radiación en gran proporción, ocurriendo todo lo contrario cuando se trata de cuerpos con superficies blancas o brillantes. No se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono (hulla, o negro de humo) puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente

Para representar adecuadamente este fenómeno de transferencia de calor, se cuenta con la "Ley de la radiación de Stefan-Boltzmann", que indica que la energía radiante emitida por un cuerpo (q'' transferencia de calor por unidad de área expresada en W/m^2) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Sin embargo, la proporcionalidad se encuentra afectada por " σ ", una constante de $5.6697 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$, conocida como la constante de Stefan Boltzmann.

$$q'' = \sigma T^4$$

La temperatura T debe estar expresada en unidades absolutas (K).

Esta relación indica un cuerpo negro (es decir, un emisor perfecto y un receptor perfecto), pero un cuerpo real no satisface las características de un cuerpo negro, dado que emite menor cantidad de radiación que este, entonces la relación se modifica a:

$$q'' = \varepsilon \sigma T^4$$

Donde ε es la emitancia de la superficie y es numéricamente igual al cociente de la emisión de radiación de un cuerpo gris (o una superficie real) con respecto a la de un cuerpo negro, o perfectamente radiante, a la misma temperatura, con valores en el rango de $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (para el cuerpo negro $\varepsilon = 1$). Este valor depende fundamentalmente del material de la superficie y del acabado.

Otra propiedad importante relativa a la radiación es la absortancia, α , representa la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor está comprendido en el rango $0 < \alpha < 1$. Un cuerpo negro ($\alpha = 1$) absorbe toda la radiación incidente sobre él.

En general, tanto la emitancia como la absortancia de una superficie, dependen de su temperatura y de la longitud de onda de la radiación.

6.3.1 RADIACIÓN NOCTURNA.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, las aplicaciones térmicas de las energías renovables ocupan un lugar destacado en el uso racional de la energía, y con esto, el empleo generalizado de sistemas pasivos, es decir, que funcionen sin necesidad de energéticos convencionales.

Por esto, es vital el estudio y aplicación de recursos pasivos para el refrescamiento y la refrigeración, particularmente en un país cuyas temperaturas, en muchas regiones, son superiores a las medias del mundo industrializado. Uno de estos sistemas pasivos corresponde a la radiación nocturna, entendiéndose como tal a la radiación térmica hacia el cielo que no tiene relación con la energía solar, sino con la radiación infrarroja hacia la atmósfera. La radiación infrarroja es un importante elemento del balance energético de las edificaciones, invernaderos, colectores solares y techos de invernaderos.

En este sentido, el desarrollo de equipos de enfriamiento que funcionen en forma pasiva es de interés para mejorar las condiciones de vida en localidades calurosas, permitiendo, entre algunas otras aplicaciones, la conservación de alimentos en buenas condiciones sanitarias, la conservación de medicamentos y vacunas en puestos de salud y, a través de una adecuada adaptación a la vivienda, el mejoramiento de las condiciones de confort de las mismas si las condiciones climáticas así lo requirieran. Se tiene conocimiento que en países tropicales el consumo de leche y carne entre otros es escaso, debido a su rápida descomposición, y la mayoría de la gente de escasos recursos económicos no cuenta con sistemas de refrigeración para su conservación. También se sabe que las cosechas de frutas y verduras se pierden por la misma causa.

La radiación nocturna que se produce en noches claras y secas tiene, como función de la longitud de onda, una intensidad cuya forma no corresponde a la distribución de un cuerpo negro sino que presenta varias ventanas, la principal se encuentra entre las 8 μm y 13 μm . Esto depende fuertemente de la humedad y de la temperatura. Idealizando que la temperatura de cielo abierto es igual al cero absoluto, y esta es invariablemente inferior a la temperatura ambiente, se obtiene que durante la noche, una superficie horizontal sobre la tierra emita más radiación de la que recibe y se enfríe. Así, la radiación nocturna, en sitios cálidos, generalmente con poca nubosidad, puede ser un mecanismo muy apropiado para enfriar.

7. DESARROLLO.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

7.1.1 Características Generales.

El sistema estudiado para enfriar con base en la radiación nocturna fue conformado a partir de una placa radiadora, un tanque de acero aislado, mangueras entretejidas, una válvula anticongelante, tres válvulas de purga y una línea de abastecimiento de agua del sistema.



Se desmanteló un panel solar plano y se obtuvo la placa radiadora de cobre color negro de 80 x 196 cm (arreglo de cuatro tubos transversales de 3/8 pulg. con aletas de cobre de 20 x 190 cm en cada uno de sus tubos, y dos tubos cabezales de 3/4 pulg por 80 cm), como se muestra en la figura 9.

Para el almacenamiento del fluido se dispuso de un tanque de acero de 46 litros al 100% de agua, colocado dos metros por debajo del absorbedor, se aisló térmicamente con 2 capas de fibra de vidrio de 1" de espesor cada capa, se recubrió externamente con tela "manta de indio" y se le aplicó finalmente una capa de impermeabilizante para protegerlo contra daños sufridos por el medio ambiente. Se le instaló una válvula de esfera en su parte inferior, como válvula de purga.

Fig 9. Placa radiadora de cobre

En la placa radiadora fueron instaladas dos válvulas de globo, una en la parte superior, para eliminar el aire dentro del sistema, y la otra en la parte inferior, como purga del fluido. Por seguridad se instaló una válvula anticongelante, la que tiene la función de proteger a la placa radiadora contra posibles heladas o descensos de temperatura extremos (por debajo de la temperatura de congelamiento del agua) y se rompan los tubos por expansión del hielo en su interior; si la válvula detecta que el fluido presenta temperatura

por debajo de los 5 °C, abre dejando escapar el fluido y cierra nuevamente de manera automática cuando detecta temperatura por arriba de los 7 °C.

La medición de las temperaturas se realiza mediante cuatro sensores de termopar marca HOBO Type T. Estos cuentan con dos canales de medición, uno mediante el cable de termopar y el otro dispuesto dentro de la caja de circuitos del sensor, colocados en el sistema para poder realizar el monitoreo de las diferentes temperaturas en los experimentos.

El canal del termopar de los sensores tiene un rango de -70°C a +180°C con una resolución min/max de 1°C/3°C. El canal ubicado dentro de la caja de circuitos tiene un rango de 0°C a 50°C con una resolución min/max de 0.4°C/2.1°C.

El sistema está expuesto a la intemperie y se encuentra ubicado a dos metros de la azotea del Edificio No. 2 del Instituto de Ingeniería, en Ciudad Universitaria, México D.F., con una inclinación de 30 grados hacia el poniente, como se muestra en la figura 10.



Fig. 10 Vista panorámica del enfriador nocturno en la azotea del edificio No. 2 del Instituto de Ingeniería de la UNAM

7.1.2 Conexiones.

Las conexiones entre el tanque de almacenamiento y el absorbedor se realiza mediante mangueras entretejidas, como se muestra en la figura 11.

La conexión superior del tanque abastece a la placa radiadora (línea de entrada de fluido a mayor temperatura), mientras que la salida de fluido (a menor temperatura) se realiza en la parte inferior de la placa radiadora contraria a la línea de llenado y conectada al tanque en su parte inferior. El abastecimiento de fluido se realiza mediante una conexión de tubo de cobre de 1/2" de diámetro, entre la red principal de agua del Edificio No. 2 hacia el tanque.

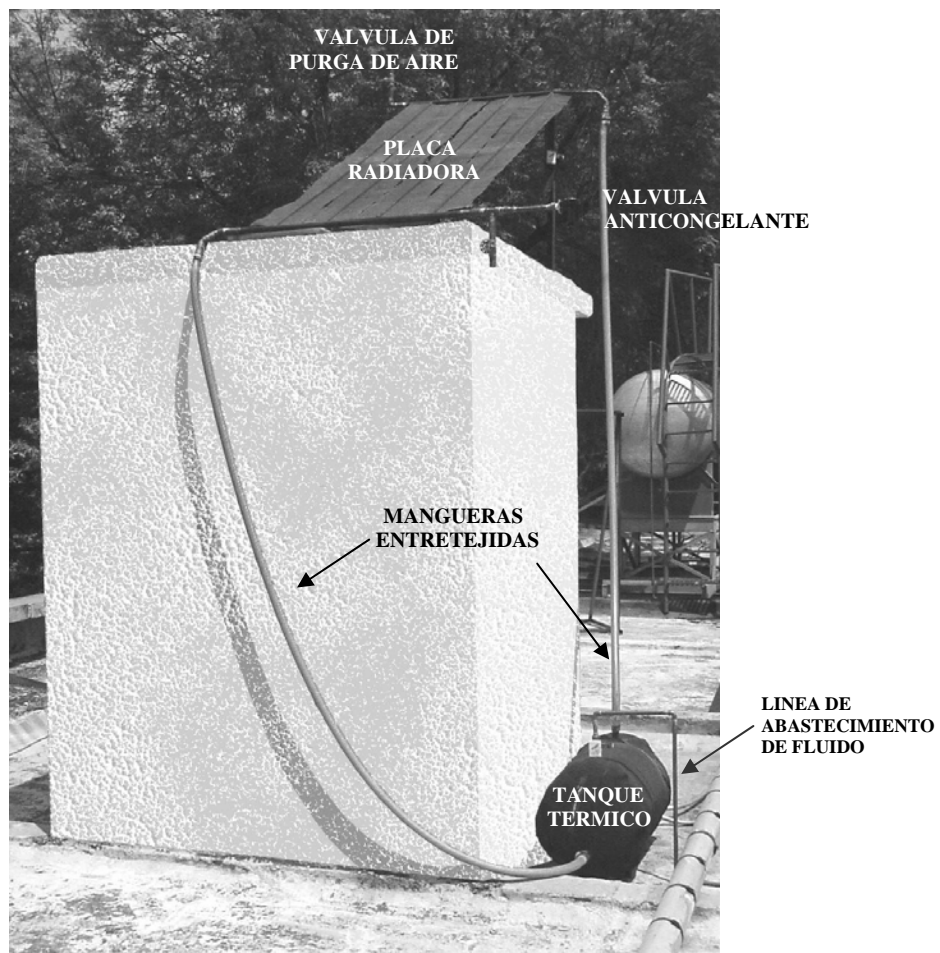


Fig. 11 Vista general de la instalación del enfriador nocturno

7.2 PREPARACIÓN DEL SISTEMA.

Como se explicó anteriormente, el sistema se conectó (tanque y absorbedor mediante manguera) y se dejó listo para su funcionamiento. Para esto se llenó del fluido seleccionado, en este caso es simple agua potable, dejando abierta la válvula superior del absorbedor que funciona como purga de aire del sistema. En la operación de llenado, cuando se derrama el agua por dicha válvula es señal de que el sistema eliminó todo el aire atrapado. El cierre de línea de alimentación y válvula de purga se realiza de manera simultánea para no introducir presión positiva al sistema.

Una vez cargado el sistema se esperó un tiempo razonable, de unos 15 minutos, para que los sensores registraran temperaturas en cada punto donde fueron colocados y así poder analizarlos. Este procedimiento proporcionó confianza sobre la pertinencia de los indicadores de temperatura seleccionados. Como ya se explicó en el capítulo 5, el sistema funciona mediante el fenómeno termosifónico, esto es, el movimiento circulatorio debido a la variación de la densidad del agua, por efecto de la variación de su temperatura.

7.3 PRUEBAS Y RESULTADOS.

El periodo de pruebas fue de un mes, donde se pudo observar el comportamiento de la temperatura del agua en el sistema respecto a la temperatura del medio ambiente. Para esto, los sensores se dispusieron de la siguiente forma, como se muestra en la fig 12:

- Sensor B: Entrada en la placa radiadora (enfriador nocturno)
- Sensor C: En la superficie de la placa radiadora
- Sensor D: Entrada al tanque térmico
- Sensor E: Temperatura ambiente, a 3 metros sobre la base de apoyo de la placa radiadora.

Los sensores B y C se colocaron a 50 cm sobre la base de apoyo de la placa radiadora

Los sensores fueron protegidos contra el medio ambiente, ya que se deterioran con la lluvia y humedad. Con ayuda de estos sensores se puede dar un seguimiento al comportamiento de las temperaturas en diferentes puntos del evento y constatar el movimiento termosifónico.

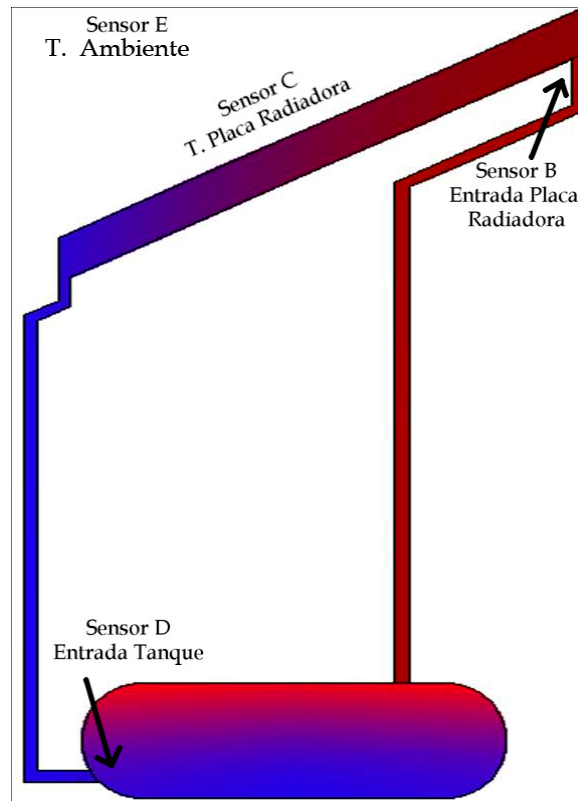


Fig 12. Colocación de los sensores de temperatura en el enfriador nocturno

Para una mejor comprensión del fenómeno y una explicación más clara, el comportamiento del radiador nocturno es analizado en bloques de 7 días, con lo que se tienen 5 periodos distintos claramente definidos en los que se observan las variaciones de temperatura y el funcionamiento del experimento.

Fechas de los periodos estudio experimental:

- 1er periodo: 19 al 25 Diciembre de 2006.
- 2do periodo: 25 Diciembre de 2006 al 01 Enero de 2007.
- 3er periodo: 01 al 07 Enero de 2007.
- 4to periodo: 07 al 13 Enero de 2007.
- 5to periodo: 13 al 19 Enero de 2007.

7.3.1 PRIMER PERIODO DE PRUEBA.

En la figura 13 se muestra el primer periodo de prueba comprendido del 19 al 25 Diciembre de 2006. En este primer periodo los sensores se programaron para mediciones de temperatura cada 30 min en ambos canales.

El sistema se inicio el día 19 del Diciembre a las 15:00 hrs. El día 20 a las 06:30 los sensores registraron las temperaturas mínimas: sensor B 7.7 °C, sensor C 6.7 °C, sensor D 6.7 °C y sensor E 4.8 °C. La temperatura del ambiente y la temperatura de la placa radiadora se comportan de manera similar, si se encuentran variaciones de la temperatura del ambiente, la placa radiadora lo detecta y por consiguiente el fluido lo reciente.

Al inicio del experimento, se observa que el movimiento termosifónico empieza hacia el ocaso (18:00 a 18:30). En este momento la temperatura del agua y la del ambiente se encuentran en equilibrio térmico; conforme transcurre el tiempo, la temperatura del ambiente desciende cada vez más hasta encontrar su valor mínimo (entre 06:30 y 07:00). En este lapso las temperaturas de la placa radiadora y del tanque también bajan, manteniéndose aproximadamente 1°C por arriba de la temperatura ambiente. Al no presentarse temperaturas del agua en el absorbedor por debajo de 5°C, el sistema sigue funcionando, pues la válvula anticongelante **no** opera.

El aumento de la temperatura en el tanque después de las 07:00 es aparentemente debido a que, al no enfriar más el agua, ya no se presenta movimiento termosifónico, por lo que el sistema se encuentra en equilibrio térmico. Además, al no estar aisladas las mangueras térmicamente, los rayos solares que inciden sobre éstas, calientan el agua en su interior y el sensor D reporta esta temperatura (del agua gradualmente mas caliente), y no la temperatura en la parte central del tanque.

Este mismo comportamiento presentó el sistema los días siguientes, (21, 22 y 23), la válvula termostática permaneció sin funcionamiento, pues la temperatura ambiente no bajó más allá de 5°C, y como se aprecia en la figura 13, la temperatura de entrada hacia la placa radiadora y a la llegada al tanque permanecen aproximadamente 1°C por encima de la temperatura ambiente (5.8°C).

El día 24, a partir de las 04:30 el sensor registra una temperatura ambiente de 4.8°C hasta las 05:30, sin embargo el tanque registra en ese mismo lapso de tiempo una temperatura mínima de 4.8°C a las 05:30, por lo que se presume un posible funcionamiento de la válvula anticongelante. Esto se supone debido a que los registros de la temperatura ambiente siguen bajando, de 06:00 a 07:00 reportando valores de 2.8°C, mientras el tanque a las 06:00 eleva su temperatura de 4.8°C a 6.7°C, en este punto se estabiliza. Este aumento se debe a que ya no se presenta movimiento de agua, pues durante la noche no existen registros de temperaturas de más de 1°C, lo que se puede corroborar con datos de noches anteriores en las cuales el sistema funcionó excelentemente.

Por otro lado, la temperatura de entrada hacia la placa radiadora (radiador nocturno) a las 05:00 reporta 8.7°C, y a las 05:30 7.7°C, por lo que el sistema se encuentra funcionando. A las 06:30 reporta 3.8°C, lo que revela que el

sensor B ya no está reportando temperatura del agua, sino del aire que se formó dentro del tubo. Para corroborarlo se observan los datos de noches anteriores donde el sistema se mantuvo en funcionamiento y no se observan temperaturas de más de 1°C, en el caso reportado la variación fue de 2°C.

Por lo tanto, con base a observaciones citadas, la apertura de la válvula termostática o anticongelante se originó entre 05:30 y 06:00 hrs cuando se registraron temperaturas menores a 5°C en el tanque. Esta válvula se cierra cuando detecta temperaturas aproximadas a 7°C (en este caso fue de 6.7°C a la entrada del absorbedor).

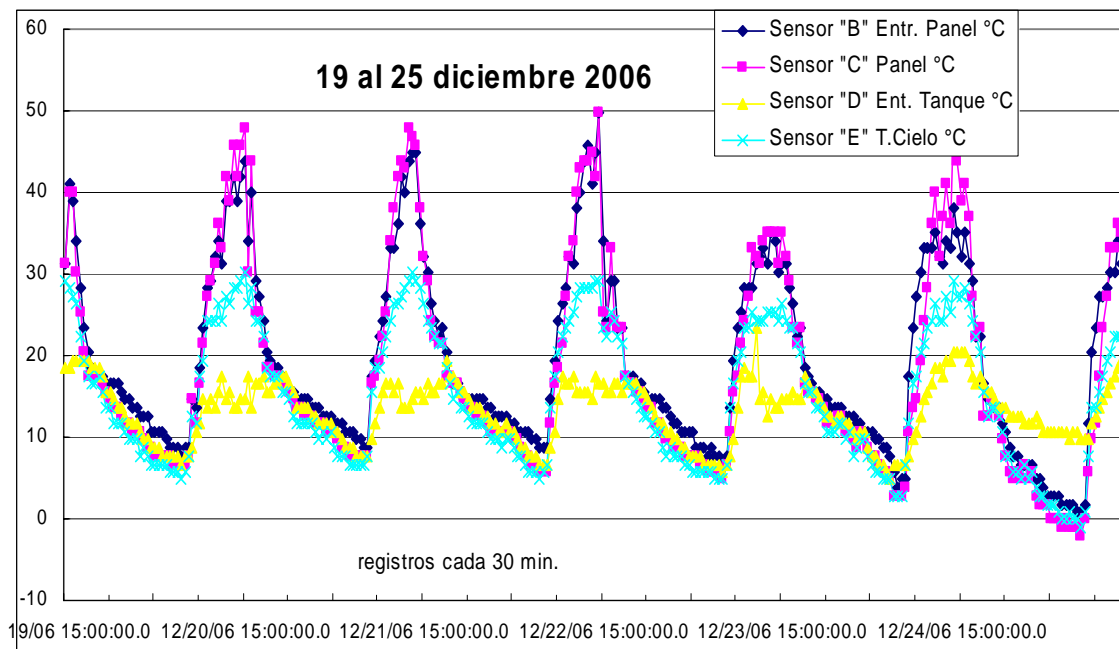


Fig. 13 Primer período de pruebas, temperaturas en función del día

7.3.2 SEGUNDO PERIODO DE PRUEBA.

En la figura 14 se muestran las temperaturas obtenidas por los sensores del segundo periodo de prueba, comprendido del 25 diciembre de 2006 y el 01 enero 2007.

El día 25 el sistema presenta una descarga (ver fig. 13, periodo anterior). Como se puede observar, el día 26 el sistema no funcionó correctamente; la temperatura del ambiente presenta un mínimo de 06:30 a 07:00 h de -3°C y la placa radiadora de -4°C. Sin embargo, el tanque se estabiliza a una temperatura de 10.6°C, por lo que el movimiento termosifónico no se estableció. La temperatura a la entrada de la placa radiadora (sensor B) no se toma en cuenta debido a que se encuentra registrando temperaturas del aire dentro de los tubos.

El día 26 el sistema es recargado a las 15:00 dejándose listo para su operación. Desde las 21:30 se comienzan a registrar bajas temperaturas en el ambiente, las que van desde 4.8°C hasta una mínima de -3°C al día 27 a las 07:00. Sin embargo, la temperatura del tanque se estabiliza en 5.8°C, lo que indica que durante todo este tiempo la válvula anticongelante estuvo en operación intermitente, pues no hay variación en su temperatura, lo que indica que el movimiento del fluido dentro del sistema fue nulo.

Por lo datos reportados, se presume que la válvula anticongelante operó entre las 00:00 y 00:30 del día 27, pues a la entrada de la placa radiadora se encuentran temperaturas de 9.7°C y 4.8°C respectivamente. El descenso de temperatura entre registros es muy brusco, por lo que el sensor B, parece haber detectado la temperatura del aire, pero no la del fluido.

El día 27 de diciembre se recarga el sistema. Sin embargo, el ambiente sigue registrando temperaturas bajas y como ya se ha visto, el sistema es sensible bajo estas condiciones. El sistema opera bien hasta las 22:00 cuando, según los registros, el descenso de temperatura en el tanque es de forma gradual, pero a las 23:00 ya no se presenta movimiento del agua, por lo que la válvula anticongelante operó, aunque la temperatura registrada del ambiente desciende hasta -1°C y el sensor a la entrada de la placa radiadora, al igual que en los días anteriores, registra solo la temperatura del aire, en el interior del tubo.

El sistema se vuelve a recargar el día 28, y al inicio del día 29 (02:30), la temperatura del ambiente desciende por de bajo de los 5°C hasta una mínima de 2.8°C. De los registros se observan pulsos, es decir, la válvula abrió parcialmente entre 01:30 y 02:00 registrando en este último punto una temperatura de 4.8°C (temperatura en tanque). Posteriormente se registra un aumento de temperatura que llega a los 6.7°C a las 02:30 pero inmediatamente se presenta un nuevo descenso a 5.8°C. Los puntos siguientes hasta las 07:30 permanecen en 6.7°C, por lo que la válvula anticongelante funcionó y el sistema no presenta movimiento de agua. Como en el día anterior el sensor B a la entrada de la placa radiadora registra una temperatura del medio, pues se estabiliza en 4.8°C, mientras en la superficie del absorbedor registra 2.8 a 4.8°C.

Durante estos días (25, 26, 27, 28 y 29) se pudo observar que el nivel del agua en la manguera del sistema se encontraba al nivel de la válvula anticongelante. Esto indica que se vació el agua en toda la placa radiadora por la presencia de estas bajas temperaturas en el ambiente.

El día 30 de diciembre al sistema se repuso de agua que el día anterior había perdido por el accionamiento de la válvula anticongelante, y la temperatura más baja en el ambiente fue de 4.8°C a las 07:30, así como a la entrada de la placa radiadora presentaron temperaturas de 6.7°C. En este punto

se observa un equilibrio térmico, no se presenta movimiento de agua pero tampoco descarga.

El día 01 enero del 2007 las condiciones climáticas cambiaron, la temperatura mínima en el ambiente fue de 10.6°C y no se presentó descarga y, como en el primer periodo, el tanque se mantuvo 1°C arriba de la temperatura del ambiente, con lo que se completó el movimiento termosifónico.

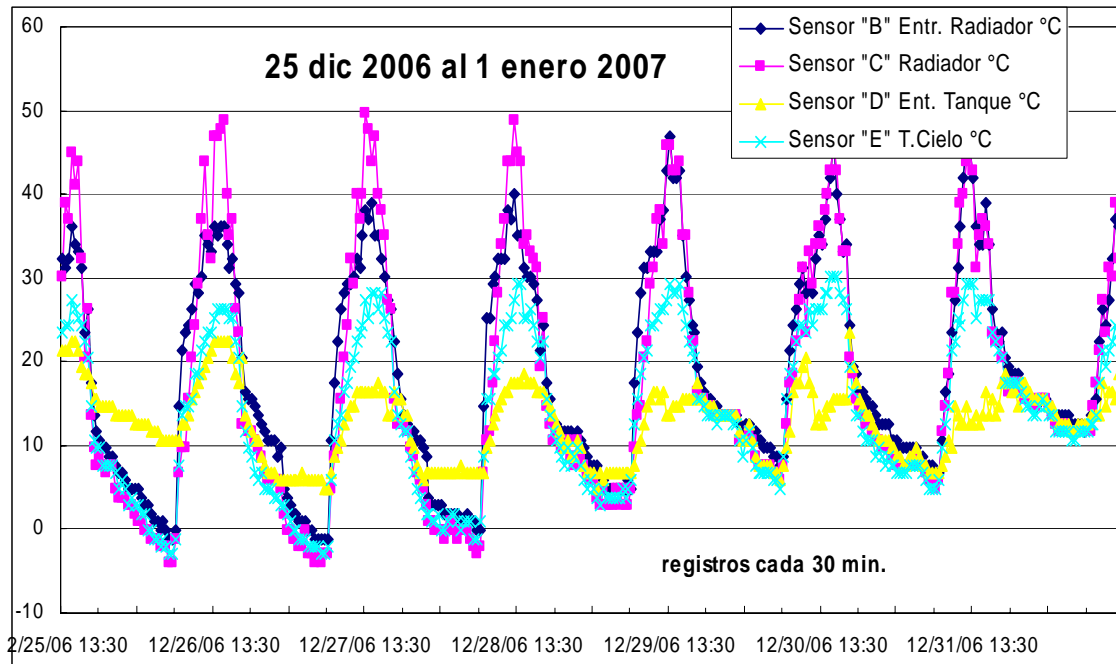


Fig. 14 Segundo período de pruebas, temperaturas en función del día

7.3.3 TERCER PERIODO DE PRUEBA.

El tercer periodo se encuentra comprendido del 01 al 07 enero de 2007.

En la figura 15 se observa el buen funcionamiento del sistema en los primeros días; no se registra pérdida de agua (pues no hay apertura de la válvula anticongelante), aunque el día 2 se presenta una mínima en el ambiente de 4.8°C; la temperatura en el tanque se estabiliza en 6.7°C.

El día 5, el ambiente reporta 3.8°C a las 06:30 y el agua presenta una temperatura de 5.8°C, que corresponde a la temperatura de accionamiento de la válvula. Esto se corrobora en el registro de temperatura en la entrada de la placa radiadora, cuando la temperatura ambiente esta en su mínimo, la temperatura a la entrada del absorbedor registra 7.7°C. Sin embargo, los registros posteriores indican una temperatura de 5.8°C y el siguiente registro de 10.6°C, por lo que se registra realmente la temperatura del medio ambiente, y no la del agua. Cuando se revisó el sistema se constató que el nivel del agua se encontraba a 52 cm medido del cabezal superior de la placa radiadora, lo que

indica claramente un derrame de fluido de casi la mitad del volumen contenido en la placa radiadora. El sistema se volvió a llenar de agua.

Para el día 6, desde las 05:00 hasta las 07:00, la temperatura ambiente registra su mínima lectura en 4.8°C , y a las 07:00 el sensor D, indica 5.8°C , que es la temperatura de funcionamiento de la válvula anticongelante. Como se ha venido observando, cada vez que la válvula abre, el registro de temperatura del sensor B cae y en la siguiente lectura se incrementa rápidamente, indicando que el registro corresponde al aire contenido dentro del tubo, no al agua dentro del sistema.

Lo que se observa en la gráfica 15, el día 7, el sistema no funcionó, al abrir la válvula anticongelante, hay pérdida de fluido y nulo movimiento termosifónico. La temperatura del ambiente mínima fue de 5.8°C , mientras que el tanque se mantuvo a 11.6°C .

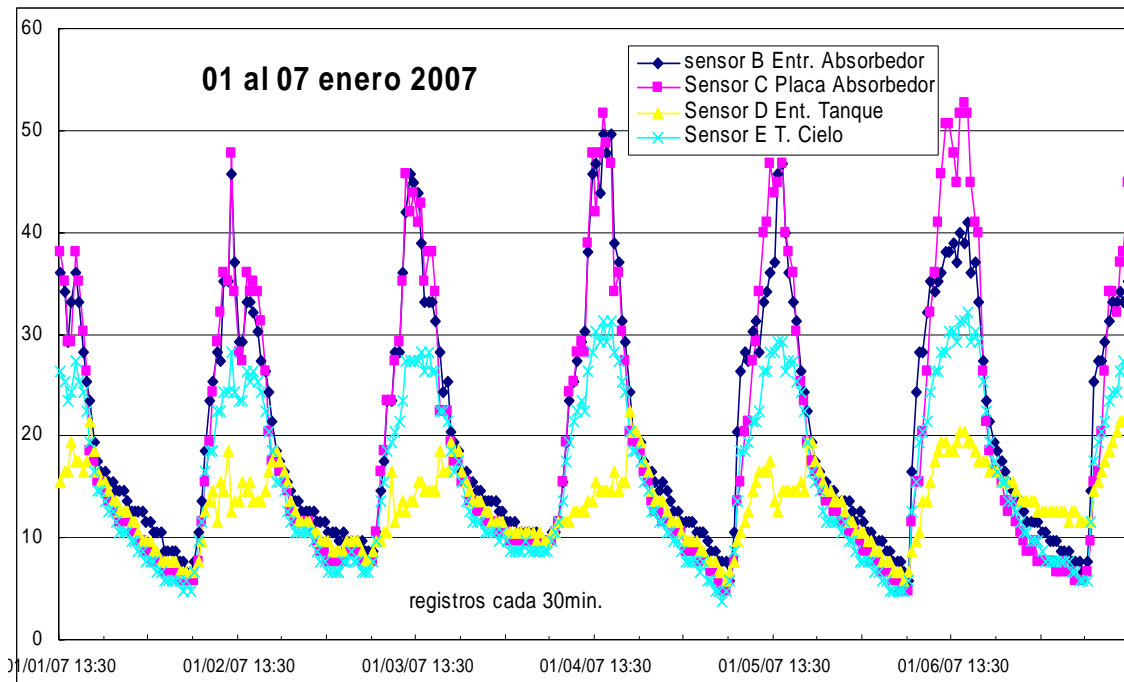


Fig. 15 Tercer período de pruebas, temperaturas en función del día

7.3.4 CUARTO PERIODO DE PRUEBA.

Del 07 al 13 de enero de 2007 es el cuarto periodo de prueba. En este periodo se hicieron algunas modificaciones a los sensores, con el propósito de poder apreciar con mayor precisión la temperatura a la cual abre la válvula anticongelante. A partir del día 08 los sensores de temperatura se programaron para registrar lecturas cada 5 min. A partir del día 12 se volvieron a programar los sensores para efectuar registros cada 15 min.

Como se puede apreciar en la figura 16, comparada con las anteriores, incluye más lecturas, y muestra más a detalle el comportamiento que presentó el enfriador durante el día. Los días 8 y 9, el sistema se encuentra funcionando apropiadamente, no se presentó apertura de la válvula anticongelante, el día 9 la temperatura más baja en el ambiente fue de 5.8°C , mientras que la temperatura en el tanque térmico fue de 7.7°C .

El día 10, a partir de las 05:45, el ambiente registra temperaturas de 2.8°C y el tanque de 4.8°C . Esta temperatura es el límite para que la válvula anticongelante entre en operación; sin embargo, los registros nos indican que el sistema se encontraba en un equilibrio térmico; esto es, la temperatura del tanque se mantuvo a 4.8°C pero a la entrada de la placa radiadora también se encontraba a 4.8°C ; no se presentó variación aunque el medio ambiente siguiera bajando su temperatura hasta las 06:35.

A partir de las 06:40, la temperatura a la entrada de la placa radiadora baja a 3.8°C , pero el tanque comienza a elevar su temperatura (de 5.8°C hasta 6.7°C), y el ambiente se mantiene a 2.8°C . El tanque se mantuvo a esta temperatura hasta las 07:45. Por lo que, según registros de eventos anteriores, la válvula anticongelante tuvo que abrir y liberar agua del sistema. Sin embargo en el transcurso del mismo día se observó que el experimento no presentaba rasgos de haber liberado agua, por lo que la válvula anticongelante pudiera estar fallando.

Hacia los días 11 y 12 el sistema se mantuvo funcionando como lo muestra la figura 16. Las temperaturas mínimas registradas en el ambiente fueron de 4.8°C y en el tanque de 5.8°C , por lo que la válvula anticongelante no detectó temperaturas de accionamiento.

Para el día 12 a las 14:00 se volvió a modificar el rango de medición en los sensores, ahora tomando registros cada 15min. El día 13 el sistema siguió en operación sin descarga de agua, la temperatura ambiente fue de 4.8°C y en el tanque de 6.7°C .

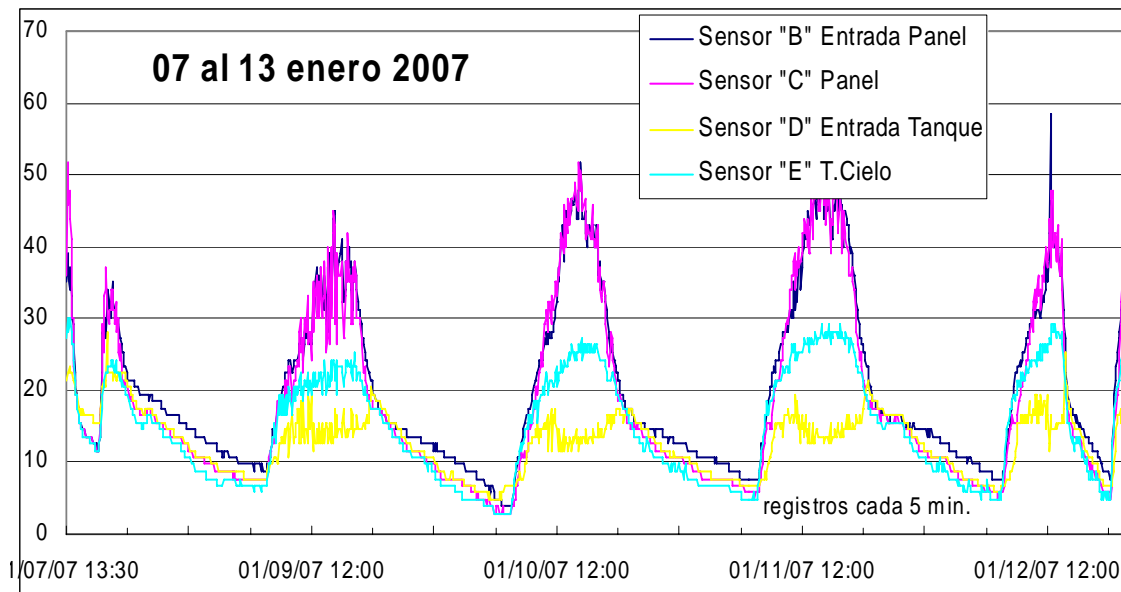


Fig. 16 Cuarto período de pruebas, temperaturas en función del día

7.3.5 QUINTO PERIODO DE PRUEBA.

Es el último periodo de análisis, comprendido entre el 13 y el 19 de enero del 2007. Como ya se mencionó, una parte de los ensayos experimentales se analizaron modificando la programación de los sensores en el enfriador nocturno. Ahora dichos sensores se programaron para realizar mediciones cada 15 minutos.

Para el día 14 se presentan temperaturas mínimas en el ambiente de 4.8°C , en la entrada de la placa radiadora de 7.7°C y el tanque a 5.8°C en el horario de 07:00 a 07:15. Como se ha podido observar, la apertura de la válvula anticongelante se realiza a temperaturas inferiores a 5.8°C , en este caso se reportan temperaturas de 5.8°C en el límite de la apertura de la válvula anticongelante; sin embargo, en el caso reportado, aparentemente la apertura de la válvula anticongelante no ocurrió, por lo que el proceso termosifónico siguió funcionando.

En este ultimo periodo, las condiciones climáticas fueron favorables para nuestro sistema de radiación nocturno. La temperatura mínima en el ambiente a partir del día 15 fue de 5.8°C y si se considera que el agua dentro del enfriador se conserva en promedio 1°C arriba de la temperatura ambiente, no se presenta funcionamiento de la válvula anticongelante y el enfriador nocturno funciona, y se manifiesta con claridad en las mediciones el movimiento termosifónico.

Como se muestra en la figura 17, en este periodo en especial, se aprecian claramente las variaciones de temperatura que ocurren dentro del enfriador. Se observa que a partir de las 19:00, el sistema entra en funcionamiento (al ocase

del sol). La temperatura del agua comienza su descenso (variación de la densidad) y el movimiento de convección natural. El fenómeno termina alrededor de las 09:00, pues la placa radiadora, por el tratamiento superficial absorbe la energía emitida por el sol y el agua comienza a calentarse en la parte superior de la placa radiadora, cesando la circulación del agua en el sistema.

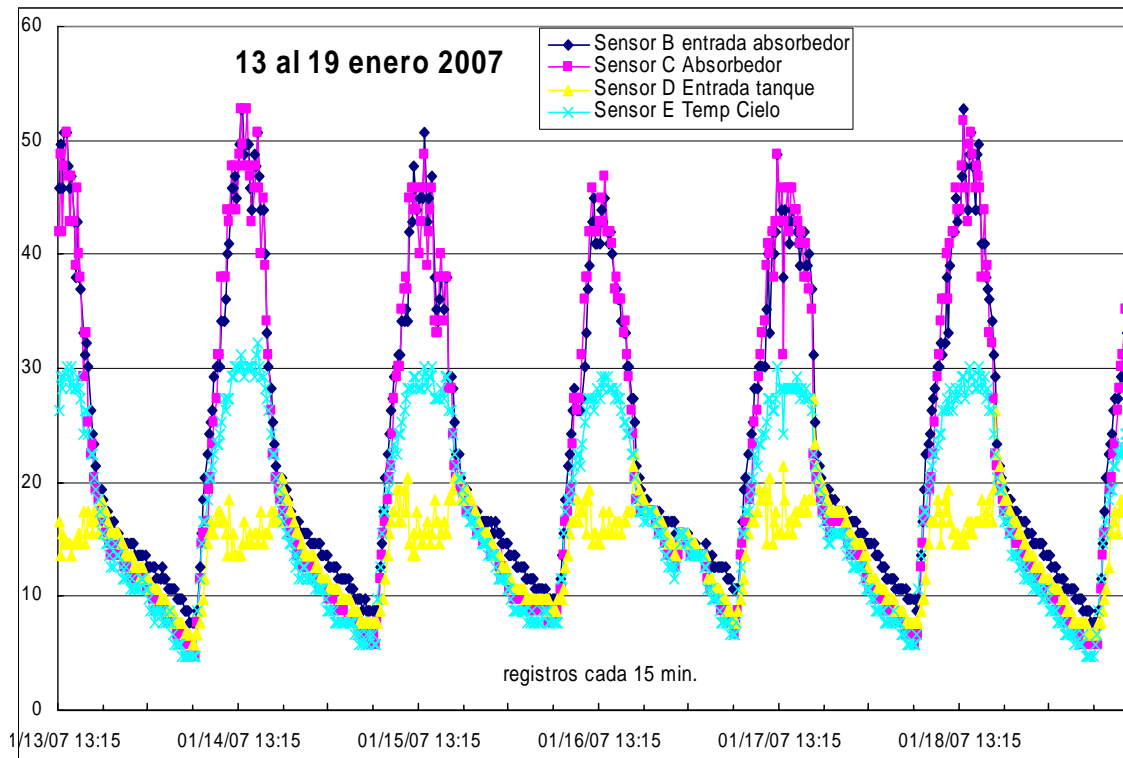


Fig. 17 Quinto período de pruebas temperaturas en función del día

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 Conclusiones.

- a) Se logró la construcción y el funcionamiento de un sistema pasivo de enfriamiento por radiación nocturna basado en el mecanismo de movimiento termosifónico.
- b) De acuerdo con los resultados de las pruebas experimentales en el radiador nocturno el sistema si funcionó de manera adecuada con el efecto termosifónico.
- c) Durante el periodo de prueba se observó que el sistema empieza su operación al ocaso (18:00 a 18:30), debido a que la temperatura del agua y el ambiente se encuentran en equilibrio térmico. Al paso del tiempo la temperatura ambiente y la placa radiadora encuentran su equilibrio alrededor de 06:30 a 07:00. El evento finaliza alrededor de las 09:00hrs.
- d) Si se presentan temperaturas menores a 5°C en la entrada de la placa radiadora, la válvula anticongelante entra en funcionamiento, permitiendo la salida del fluido de trabajo evitando la formación y expansión del hielo al llegar el agua a 0°C y el rompimiento de los tubos de la placa radiadora.
- e) Cuando la válvula anticongelante abre, el sensor B (en la entrada de la placa radiadora) registra temperaturas mas bajas y la siguiente lectura se incrementa registrando la temperatura del ambiente, no del fluido.
- f) La placa radiadora y tanque se mantiene aproximadamente 1°C arriba de la temperatura ambiente, debido a las condiciones climáticas en que se realizaron las pruebas experimentales, sin embargo, se espera que bajo un clima seco y cielo despejado se logren temperaturas menores a la del ambiente.
- g) La existencia de diversos factores, como la humedad y el smog en la atmósfera, producen una barrera que no permite la radiación ideal a cielo abierto, limitando el enfriamiento nocturno.

8.2 Recomendaciones para un trabajo posterior.

Como primer experimento y pionero en enfriamiento nocturno hacemos las siguientes recomendaciones.

- a) Realizar pruebas experimentales variando el ángulo de inclinación de la placa radiadora.
- b) Realizar el experimento bajo climas secos y despejados, para una mayor radiación nocturna.
- c) Realizar un tratamiento a la superficie del absorbedor que permita alta emisión en el rango infrarrojo. Un ejemplo es el color negro mate, pues a diferencia del cromo negro es altamente absorbente de la luz solar y posee baja emitancia térmica.

- d) Realizar pruebas experimentales con un líquido refrigerante para conocer el comportamiento del enfriador nocturno a temperaturas abajo de 0°C sin dañar el equipo, así retirar la válvula anticongelante.
- e) Colocar aislamiento térmico a las dos mangueras de conexión entre la placa radiadora y el tanque para eliminar incrementos de temperatura del agua durante el día.

BIBLIOGRAFÍA

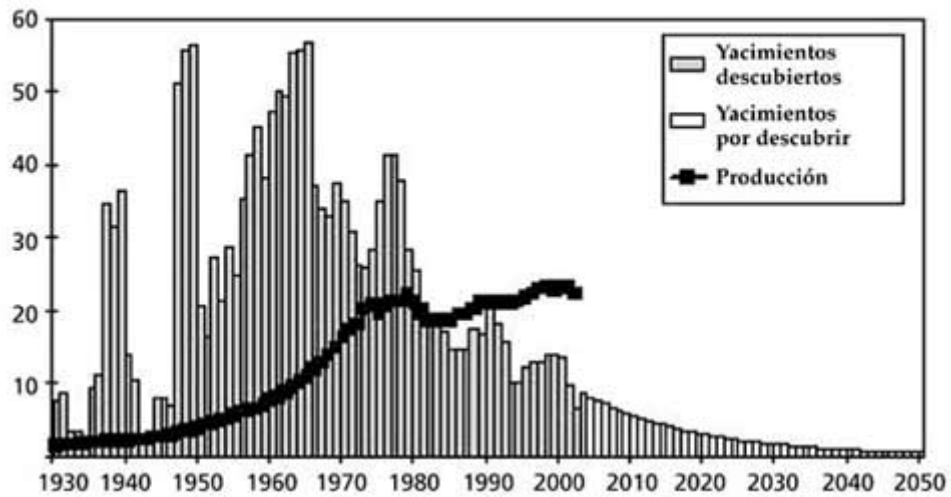
- Barbosa J.G., Quinto P., Zurita V.J. "Diseño de un sistema experimental para calentamiento de agua". Memorias de la Asociación Nacional de Energía Solar, pp 136-141, octubre 1997
- Martín R. Jiménez, Felipe H. Bautista, Rubén Dorantes R. "Construcción de un concentrador solar a partir de una antena parabólica", Memorias de la Asociación Nacional de Energía Solar, pp 170-176 octubre 1997.
- Arturo P. Galindo, Ignacio R. Martín "Diseño conceptual de un destilador solar utilizando tubos de calor", Memorias de la Asociación Nacional de Energía Solar, pp 200-205, octubre 1997.
- Torres E., Picon M., Navarrete J.J., Prototipo para el secado solar de frutas por convección natural", Memorias de la Asociación Nacional de Energía Solar, pp 384-387, octubre 1997.
- Fernández JL, "Modelo simplificado para calcular pérdidas térmicas de captadores solares planos", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM,
- Khedri J, Waewsak J, Thepa S, Hirunlabh J, "Field investigation of night radiation cooling under tropical climate", Renewable Energy, 2000.
- T. S. Saitoh "A highly-advanced solar house with solar thermal and sky radiation cooling", Applied Energy, vol 70, No 1, pp 63-67, 2001.
- Frigerio E. "Sistema solar de refrigeración, dimensionamiento de los componentes", ASADES, 1999.
- R. Lozano, E. Frigerio "Sistema de refrigeración por convección natural: nuevos ensayos", ASADES. 1999.
- E. Frigerio "Sistema solar de refrigeración por adsorción/desorción: características del carbón activado", ASADES. 1999.
- E. Frigerio "Ensayo de mejoras propuestas para un equipo de enfriamiento con butano", ASADES. Vol 6, No. 2, 2002.
- E. Frigerio "Dos alternativas de enfriamiento pasivo", ASADES. 2000.
- E. Frigerio "Enfriamiento pasivo: Ensayo en Cachi", ASADES. Vol. 8 No.2, 2004.
- E. Frigerio "Nuevos componentes de un equipo de enfriamiento", ASADES. Vol 9, 2005.
- E. Frigerio "Radiación nocturna: Compañías en Cachi", ASADES. Vol 8, No. 2, 2004.
- David Morrillón Galves "Introducción a los sistemas de pasivos de enfriamiento", UNAM 2002 Guadalajara Jal..
- N. DiLalla, R. Tarulla, R. Echazú "Películas selectivas de cromo negro para absorbedores fototérmicos", ASADES. Vol 5, 2001.
- E. Frigerio "Radiación nocturna y enfriamiento". INENCO, 2001
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt. "Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición" Prentice Hall. 1999.
- Sears, Zemansky, Young "Física Universitaria", Fondo educativo universitario, sexta edición 1986.

ANEXOS.

ANEXO 1

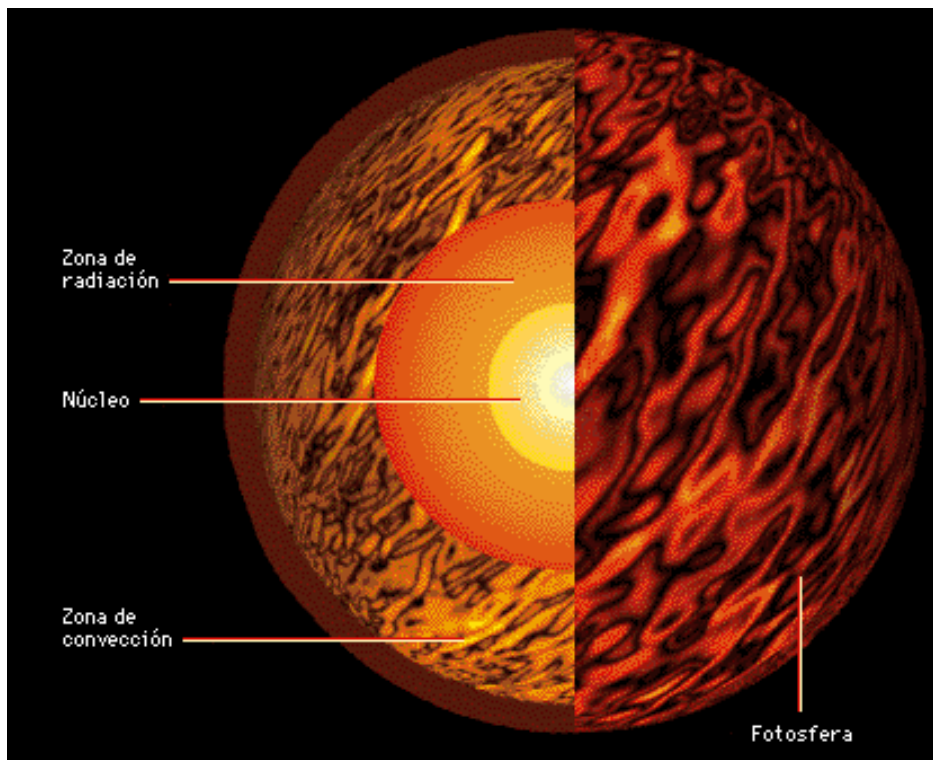
El creciente déficit entre los descubrimientos y la producción de petróleo a nivel mundial (1 Gb = mil millones de barriles). Fuente: ASPO, Boletín N° 57 - Septiembre 2005.

Pico de Petroleo



ANEXO 2.

EL SOL.



El Sol es la principal fuente de energía renovable.

Es una enorme esfera gaseosa (con una masa 330 000 veces mayor que la de la Tierra), con un diámetro de $1.39 \times 10^9 \text{m}$, situado a la distancia media de $1.5 \times 10^{11} \text{m}$ respecto de la Tierra. Esta distancia se llama unidad astronómica.

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de 10000000K ($10 \times 10^6 \text{K}$), pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, la temperatura "efectiva de cuerpo negro" es de 5762K (calculada según el modelo radio activo del cuerpo negro).

ANEXO 3.

❖ Pero, porque flota el hielo?

El hecho de que el hielo flote en el agua, se debe a que el hielo es más ligero que el agua. A medida que la temperatura del agua cercana a la superficie disminuye, aumenta su densidad, el agua más fría se va entonces hacia el fondo, mientras que el agua más tibia, que es menos densa, sube a la superficie. Este movimiento normal de convección continua y se repite hasta alcanzar los 4°C . Cuando la temperatura desciende por debajo de este valor, la densidad del agua empieza a disminuir, de modo que el agua ya no se va al fondo. Con mayor enfriamiento, el agua de la superficie se empieza a congelar. La capa de hielo formada no se hunde por ser más ligera que el agua, incluso actúa como un aislante térmico para el agua que esta debajo. Este fenómeno se observa fácilmente en los vasos con agua y hielo, así como en los glaciares polares, y tiene un efecto determinante en la diversidad biológica de los mares y los ríos.