

11  
2 Gen

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**



---

Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería Civil, Topografica y Geodesica

**USO DE LA ENERGIA SOLAR EN LA EDIFICACION**

**Tesis Profesional**

Elaborada para obtener el Título de  
**INGENIERO CIVIL**

P r e s e n t a n

**Jesús Rigoberto Arellano Vázquez**

**José Luis Carrillo Escobar**

México, D. F.

Nov. 1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## TEMARIO

### CAPITULO I. Antecedentes.

1.-Necesidad de la energía para la vida.

2.-Fuentes de energía.

3.-Utilización de los diversos tipos de energía a través del tiempo.

a) Desde la aparición del hombre

hasta antes de la Revolución Industrial.

b) De la Revolución Industrial hasta nuestros días.

c) Futuro de los diversos tipos de energía.

### CAPITULO II. Conceptos fundamentales.

1.-Energía.

a) Principio de la conservación de la energía.

b) Potencia.

c) Unidades de energía y potencia.

## 2.-Transmisión de calor

a) Modos de transmisión de calor.

b) Transmisión de calor a través de techos,  
pisos y paredes.

c) Transmisión de calor a través de ventanas.

## 3.-Enfriamiento evaporativo.

## 4.-Balance térmico del cuerpo humano

## 5.-Balance térmico de un sistema.

# CAPITULO III. Uso de la energía solar.

## 1.-Captación

a) Sistemas termodinámicos.

b) Sistemas fotovoltaicos.

c) Sistemas fotoquímicos.

d) Sistemas termiónicos.

## 2.-La acumulación

## 3.-Usos

# CAPITULO IV. Aplicaciones de la energía solar a la edificación.

## 1.-Manejo del clima para la modulación de las condiciones de confort dentro de las edificaciones

a) Sistemas pasivos de calentamiento.

b) Sistemas pasivos de enfriamiento

2.-Sistemas de calentamiento de agua.

a) Sistema de calentamiento de agua a circulación natural o termosifón.

b) Sistemas de calentamiento solar de agua a circulación forzada.

3.-Generación de energía eléctrica

4.-Refrigeración y aire acondicionado.

**CAPITULO V. La energía solar como recurso y la política en México.**

1.-Panorama general y políticas de desarrollo.

2.-Derecho al sol.

3.-Panorama nacional de investigación.

**CONCLUSIONES.**

## Capitulo I. Antecedentes

### 1.- Necesidad de la energía para la vida.

Las antiguas civilizaciones veneraban fuerzas y fenómenos de la naturaleza, particularmente al sol ya que de alguna forma intuían la importancia que tiene para la vida. Así encontramos que desde el neolítico (XII a. de C.) ya se adoraba al sol; con la agricultura aumentó el culto natural al mismo, poderosa fuerza y, evidentemente, dador de luz y calor. En Egipto debido a que las crecidas del Nilo sobrevenían siempre en el momento en que el sol alcanzaba cierta posición entre las demás estrellas, se acabó por atribuir al mismo el control sobre todo el ciclo vital del río y se le consideró dador de toda la vida. Bajo diversos nombres los egipcios adoraron al sol durante milenios. El nombre más conocido del dios sol era Re o Ra, (1). Análogamente los fenicios lo adoraron con el nombre de Baal; los helenos adoraron al sol, a los animales y a las plantas, los teotihuacanos construyeron la pirámide del sol y de la luna; los aztecas representaron a Tonatiuh (dios del sol) en el calendario azteca y lo invocaban como "dador de vida", (2).

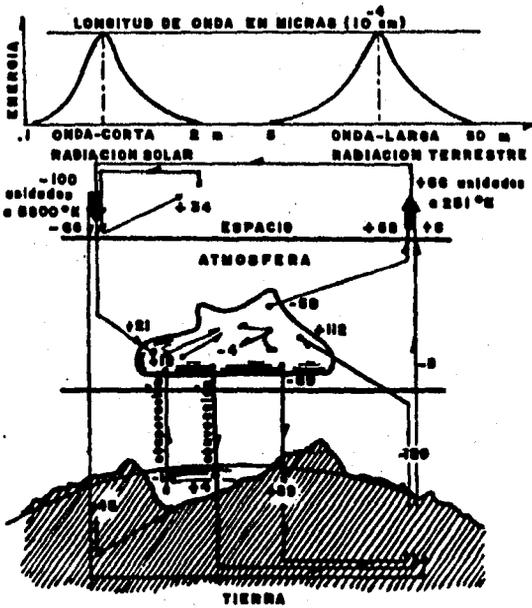
Con el transcurso del tiempo, la humanidad ha estudiado

y tratado de entender al astro como generador de energía. Existe una relación de cantidad de átomos generados en las estrellas con la cantidad de elementos químicos en la tierra, por lo que podemos afirmar que el origen y evolución de la vida se debe al origen y evolución de las estrellas, así es como la radiación ultravioleta del sol y el calor del mismo generaron relámpagos impulsando a las moléculas orgánicas que dieron origen a la vida, (3).

La energía proveniente del sol es debida a las reacciones termonucleares que en él se producen, convirtiendo 400 millones de toneladas de hidrógeno en helio cada segundo, (4), dicha conversión explica el brillo del sol con fotones ("cuantos") de luz visible y neutrinos. En cuanto a los neutrinos, no los podemos detectar visualmente y su estudio no se ha profundizado, (3).

La energía del sol que intercepta la tierra se ha calculado tomando un radio medio aproximado de 6360 Km, y es de  $1.77 \text{ E} + 14 \text{ Kw}$ . La distribución de la radiación solar sobre la superficie de la tierra varía con la latitud del lugar y la época del año.

La luz viaja a razón de 300,000 Km/s en forma de onda corta (espectro azul a ultravioleta) equivalente a impactos de energía y la radiación de onda larga (roja a infrarroja) consistente en impactos de menor energía, (5). En el espectro solar se encuentran la región ultravioleta



Balace de energia entre la tierra y el espacio.

Figura 1.1

(de 0.115 a 0.405 micras) con 9.29% de la energía, la región visible (de 0.405 a 0.740 micras) con 41.48% de la energía, y la región infrarroja (de 0.740 a 1000 micras) con 49.23% de la energía; de hecho 48.74% de la energía en el espectro solar se encuentra en la región de 0.74 a 5 micras, (6).

La tierra, la atmósfera y los océanos reciben la radiación del sol alrededor de una longitud de onda de 0.5 micras, y correspondiente a un cuerpo opaco negro con temperatura de 5800°K. En cambio la tierra radia parte de esta energía convertida, al espacio exterior a una temperatura más baja de aproximadamente 290°K, y una longitud de onda de 10 micras (figura 1.1), (7). Estos valores del espectro solar son importantes para la selección de algunos de los materiales que se utilizan en el aprovechamiento de este tipo de energía, (6).

Las capas fluidas de la tierra (atmósfera y agua) favorecen el transporte de calor en forma de vapor de agua del ecuador hacia los polos, recorrido en el cual se condensa el agua y se precipita en forma de lluvia; también se transporta calor en el sentido mencionado por medio de las corrientes marinas; sin la existencia de estos ciclos no sería posible la vida, (5).

La radiación solar se altera considerablemente (por dispersión y absorción) al pasar a través de la atmósfera, (6). La capa de ozono absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta, mientras que la radiación

infrarroja atraviesa dicha capa. Entre estos dos rangos se encuentran los fotones de luz que producen cambios en los átomos de los organismos pero sin destruir la organización celular (tabla 1.1), (5) y (7).

Las moléculas especializadas en captar la energía de la luz son la clorofila y los carotenoides en un proceso llamado fotosíntesis en el que los vegetales transforman el bióxido de carbono y el agua en oxígeno y carbohidratos (azúcares, almidones o celulosa); de esta manera la energía solar ha sido transformada a energía química. Cabe señalar que la energía aprovechada por las plantas alcanza solo un 6% como máximo de la radiación solar incidente, de la que la mitad es consumida por ellas mismas en su respiración y metabolismo.

Se establece en la naturaleza una cadena alimenticia en la que los herbívoros se alimentan directamente de los vegetales y los carnívoros de los herbívoros y de otros carnívoros; al perecer éstos, son devorados por otros y el resto entra en descomposición y sus elementos vuelven a formar parte de las plantas que los absorben. El flujo de energía en cada eslabón se reduce una décima parte, (5).

## Absorción de la Radiación Solar

		Porcentaje (%)	Intensidad (Cal/cm <sup>2</sup> ·min)
Radiación dispersada y reflejada por la más alta capa atmosférica.	▬▶	34	0.170
<b>Atmósfera:</b>			
Absorción en la termósfera (corto ultravioleta).	▬▶	1	0.005
Absorción del ozono en la estratósfera (ultravioleta).	▬▶	2	0.010
Vapor de agua en la tropósfera (infrarrojo).	▬▶	18	0.090
<b>Tierra:</b>			
Absorción por la corteza.	▬▶	15	0.075
Océanos, lagos y ríos.	▬▶	30	0.150
Radiación solar total para la tierra.	▬▶	100	0.500

Tabla 1.1

## 2.- FUENTES DE ENERGIA.

PRIMARIAS

RENOVABLES

SOLAR  
EOLICA  
HIDRAULICA  
BIOENERGIA  
GEOTERMIA -Manifestaciones  
superficiales -

NO RENOVBLES

PETROLEO  
CARBON  
GAS NATURAL  
URANIO  
GEOTERMIA -Inducida-

SECUNDARIAS

CONVENCIONALES

ELECTRICIDAD  
DERIVADOS DEL PETROLEO

QUE RESULTAN DE  
FUENTES  
RENOVABLES

ELECTRICIDAD -Por pequeñas  
caídas de agua-  
CALOR -Residuo calorífico-  
GAS -De desechos-  
ELECTRICIDAD -En corriente  
continua-

3.- Utilización de los diversos tipos de energía a través del tiempo.

a) Desde la aparición del hombre hasta antes de la revolución industrial.

La primera fuente de energía no propia que utilizó el hombre, fue el fuego descubierto probablemente en forma accidental (era Paleolítica), de alguna fuente natural como son los incendios de bosques, erupciones volcánicas o salidas de gas natural, (8). Posteriormente lo logró obtener al golpear el pedernal contra un trozo de pirita o de hematitas (utilizado en Europa en la última edad de hielo), (9). Primeramente se debe haber utilizado para calentar el cuerpo en las noches frías, para atemorizar a los animales y explorar lugares recónditos. Una vez que aprendió a producir y a controlar el fuego, surge la práctica de cocinar. En esta era la fuerza motriz es en rigor la energía muscular humana.

En la era neolítica hace unos 8,000 años surgió la agricultura, que junto con la utilización del fuego y el empleo de la fuerza mecánica, constituye una de las tres invenciones más importantes de la historia humana, ya que es el primer paso a la economía completamente productiva. De la práctica de cocinar con fuego se desarrollaron los usos más específicamente controlables y científicos de éste,

en la cerámica y más tarde en la edad del bronce el trabajo de los metales.

En esta era con la domesticación de los animales se aprovechó la energía mecánica de éstos para carga (transporte de materiales) y de tiro (arado).

En la edad del bronce se empezó a utilizar la energía del viento con la invención de la vela, lo cual ayudó enormemente a la necesidad de transportar mercancías en cantidades grandes. El desarrollo del transporte terrestre combinó dos ideas de importancia primordial, el empleo de la fuerza animal y la rueda, (8).

En esta edad, por la necesidad de llevar agua a poblados grandes, se construyeron canales o conductos hechos de piedra y provistos de cubiertas que impedían la evaporación y suciedad; su funcionamiento era por gravedad aprovechando la energía potencial ganada por el agua debido a su posición, (9).

En la edad de hierro la economía fue fundamentalmente estable hasta la introducción de la esclavitud en gran escala, siendo ésto un aprovechamiento de la energía mecánica del hombre. Para esta edad se aprovechó la energía hidráulica con la invención de las ruedas hidráulicas. El hierro se obtuvo a través de la reducción a baja temperatura del mineral, utilizando carbón vegetal, (8).

En lo referente a sistemas térmicos pasivos (posteriormente se describirán con detalle), constituyen

la más antigua de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar y el clima. Las primeras referencias a sistemas solares pasivos se remontan al periodo helénico de la Grecia antigua (siglo V a. de C.), cuando Aristóteles, Jenofonte y Esquilo bosquejaron los principios de la helioarquitectura.

Para el siglo IV a. de C. los griegos conocían ya el principio básico de los colectores solares con seguimiento o de enfoque, sabían que apuntando varios espejos hacia un mismo lugar se podía prender fuego a un objeto (los espejos empleados eran de plata o cobre pulidos). En el siglo III a. de C. se construyeron espejos cilíndricos y parabólicos con los que eran capaces de encender un fuego más eficiente. Posteriormente durante el primer siglo de nuestra era, Vitruvio, Paladio y Faventino, enfatizaron la importancia de tomar en cuenta la orientación de las construcciones para aprovechar la energía solar. El empleo de vidrio en ventanas para capturar el calor solar y de almacenes térmicos para conservarlos es atribuible a los romanos quienes, fué posible que conocieran también "el efecto de invernadero", (6).

Hace unos 2,000 años se originaron en Persia los molinos de viento de eje horizontal, (10). En el siglo II d. de C. se inventaron los molinos de agua que con modificaciones posteriores (siglo IX) pudieron usarse en gran variedad de industrias: molienda de grano; trituración de la corteza de roble para obtener materias

primas en el curtido de pieles; pulverización de minerales para fabricar colorantes; desmenuzamiento de mineral de hierro; prensado de aceitunas; fabricación de papel. Con piedras de amolar movidas por energía hidráulica se pulían los cuchillos, armas y armaduras. Se utilizó también para la fabricación de alambre; la madera era cortada con sierras hidráulicas, y en las minas empleaban elevadores movidos igualmente por energía hidráulica, (11).

A principios del siglo XIV se desarrollaron en Francia los molinos de viento de torre, (10). Un siglo después los molinos de viento y agua se habían convertido ya en el más importante complemento de la fuerza humana y animal; la energía hidráulica era la principal fuente energética en casi todas las industrias europeas.

La gran cantidad de carbón vegetal empleado para la fundición de hierro, fue uno de los motivos que produjeron la aguda crisis de madera a fines del siglo XVI. Sin embargo se encontró un sustituto en la hulla, la que vino a resolver las crisis recurrentes de combustible, que antes habían impulsado a la civilización hacia los bosques vírgenes.

En el siglo XVII hubo un gran desarrollo científico y un continuo aumento en la producción, principalmente en la industria textil, lo que dió origen en 1760 a la Revolución Industrial, (8).

b) De la Revolución Industrial hasta nuestros días.

El rápido mejoramiento de las técnicas agrícolas, así como el de los transportes y técnicas de minería (máquina de vapor), provocaron un cambio definitivo de la economía basada en la agricultura a la economía fundada en los yacimientos de hulla, o sea, de una economía de los alimentos a una economía de la energía.

En el siglo XVIII la industria textil ocupaba un lugar primordial en la economía de varios países. La necesidad de optimizar los procesos de esta industria, para cubrir la demanda creciente de telas, los llevó al empleo de la energía hidráulica en el abatanado, y de hulla para el lavado y teñido. Así en 1750 se introdujo una nueva fibra: el algodón. Se requería de técnicas nuevas diferentes a las tradicionales para producir las telas de algodón, por lo que se hicieron algunas invenciones. El empleo de éstas a tan gran escala agotó la capacidad de los pequeños ríos próximos a las fábricas textiles, por lo que se adaptó la máquina de vapor de Watt para mover los telares en 1785.

La concentración vino a ser una de las características primordiales de la Revolución Industrial. La industria doméstica feudal, e incluso la producción urbana de los artesanos, se encontraba necesariamente muy dispersa. En cambio, la nueva industria mecanizada se estableció desde un principio en las minas de carbón.

La máquina de vapor no solo tuvo importancia en la industria textil, sino que fue aprovechada en el transporte tanto marítimo (buque de vapor) como terrestre (ferrocarril).

En los dos primeros tercios del siglo XVIII una de las mayores contribuciones científicas, fue en el campo de la electricidad: electricidad por fricción, conductividad eléctrica, pararrayos, condensador eléctrico, etc.

En el siglo XIX se amplió el campo en todas las industrias, y la electricidad no fue la excepción. La invención del dínamo es el resultado del descubrimiento de que la corriente de una máquina puede ser utilizada para excitar el campo del electroimán de otra (el dínamo es un símbolo de la nueva edad de la energía). Todas las aplicaciones de la electricidad fueron elaboraciones de los experimentos electromagnéticos originales, efectuados por Oersted y Faraday. En 1866 la transmisión telegráfica a distancias cortas fue el resultado de una aplicación de la electricidad.

La contribución en 1881 de Edison fue la estación eléctrica con su red de líneas maestras que distribuyen la electricidad en todas partes.

Una vez que la electricidad tuvo que ser generada y distribuida para suministrar corriente eléctrica, pudo ser utilizada como fuerza matriz. Entonces se puso a disposición de la industria y los transportes un nuevo medio, universal y barato, de distribución de energía;

pero no fue sino en el siglo siguiente cuando se desarrollo a plenitud.

Las ideas de Carnot y la Termodinámica resultaron muy eficaces en la invención de la turbina, del motor de combustión interna y del refrigerador.

Estos nuevos desarrollos establecieron una división de los modos de producir energía en dos esferas más manejables y adaptables. El motor de combustión interna hizo posible las plantas de luz, los vehículos de motor y, finalmente, el aeroplano; y, por su parte, la turbina de vapor permitió los buques gigantescos y la generación de energía eléctrica fácilmente distribuible.

A pesar de estos descubrimientos, la aplicación de los mismos fue hasta el siglo XX. La principal fuente de energía durante el siglo XIX y hasta el primer medio del siglo XX, fue la hulla. En forma alterna se siguió utilizando la energía hidráulica, (8).

En la figura 1.2 podemos apreciar la manera en que ha aumentado la producción mundial de energía durante este siglo; la casi totalidad del incremento proviene del petróleo, y la curva asciende agudamente en los años 50 y los 60 debido al crecimiento de la actividad económica mundial, al precio descendente del petróleo en términos reales y a las crecientes preocupaciones sobre el medio ambiente con respecto a otros combustibles, (12).

# Producción y consumo mundial de energía. (Incluidas las áreas comunistas)

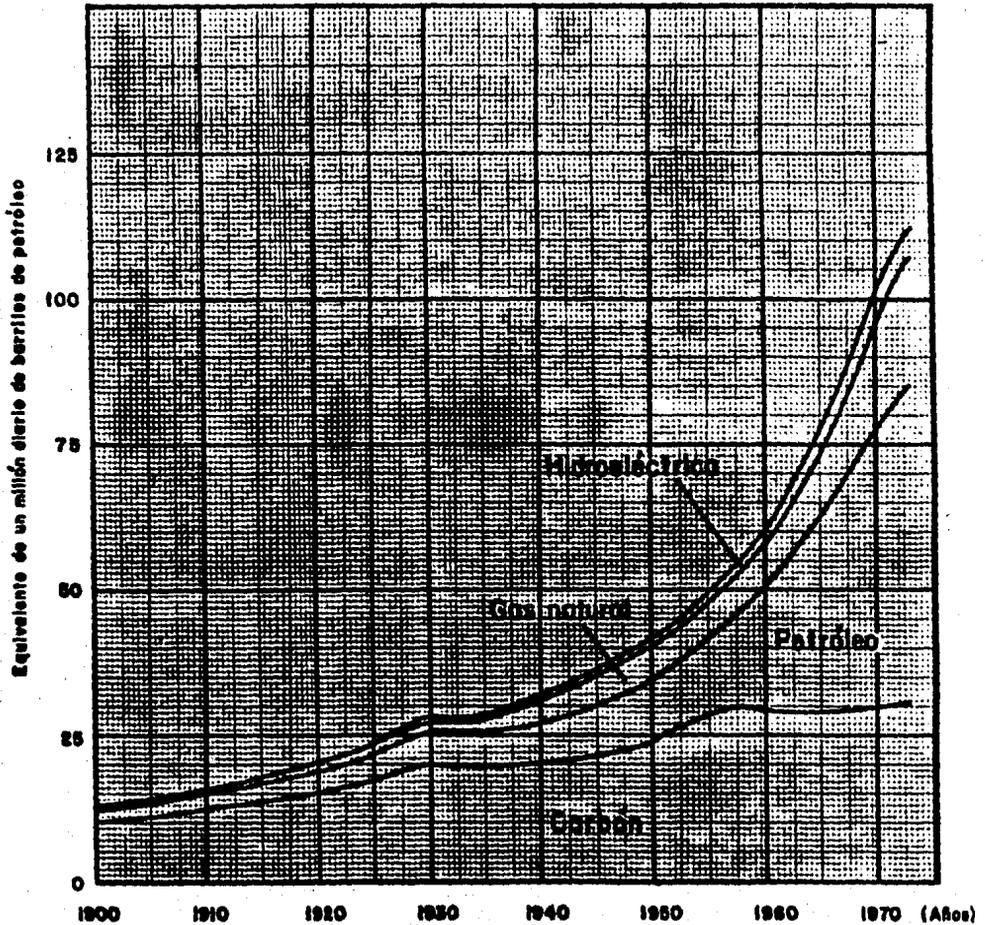


Figura 1.2

c) Futuro de los distintos tipos de energía.

En un futuro la producción mundial de petróleo comenzará a descender, por lo que los combustibles sustitutivos habrán de cubrir la demanda de energía.

De acuerdo a los estudios realizados por el WAES (Workshop on Alternative Energy Strategies), se estima que la oferta de petróleo dejará de cubrir la demanda creciente de energía, antes del año 2000, compensando esta demanda con recursos energéticos diferentes del petróleo, pues se piensa que este recurso quedará destinado finalmente solo para usos en los que sea indispensable. Asimismo esta creciente demanda de energía obligará al mundo a enfocar progresivamente su economía a otros tipos de fuentes de energía, como por ejemplo la energía atómica, la cual puede aportar en un futuro buena parte de la oferta energética mundial; también se cuenta con grandes reservas de carbón que podrían cubrir las demandas futuras de energía; otro recurso que se tiene en grandes proporciones, es el gas natural.

Por otro lado, se piensa que la energía hidroeléctrica, así como otras fuentes renovables de energía como son: la solar, la biomasa, la eólica, la de las mareas y de las olas; no aportarán cantidades significativas de energía a la oferta mundial antes del año 2000, sin embargo seguramente tendrán un desarrollo y aportación considerables después de ese año.

El problema crítico que se tendrá en un futuro son los desniveles entre la oferta y la demanda de energía, sobre todo en el caso del petróleo. Una proyección hecha por el WAES muestra claramente este caso (figura 1.3).

De lo anterior podemos concluir que la oferta de petróleo es incierta, con lo que probablemente la demanda potencial de esta fuente energética, no será satisfecha con la producción de petróleo crudo de fuentes convencionales.

Si consideramos un crecimiento económico alto, un precio de la energía ascendente y como principal combustible de reemplazo al carbón, tendríamos la proyección que se muestra en la figura 1.4.

En esta figura se puede apreciar el potencial del carbón como fuente energética sustitutivo, lo que ocurriría en caso de que los países consumidores de energía tomaran las medidas necesarias para producirlo, transportarlo y plantearan soluciones provechosas para reducir su efecto contaminante al medio ambiente.

En cuanto al gas natural, sabemos que las reservas mundiales son grandes por lo que en un futuro el uso de esta fuente energética no se verá impedido por la falta del mismo, sino mas bien por los problemas de transporte y distribución del gas desde el productor hasta el consumidor.

Se puede pensar también en la posibilidad de utilizar la energía atomoeléctrica como reemplazo del petróleo

# Demanda y oferta energéticas en el mundo fuera de las áreas comunistas

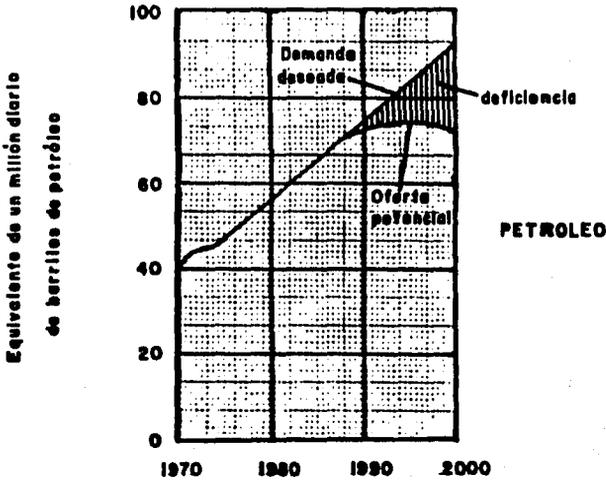


Figura 1.3

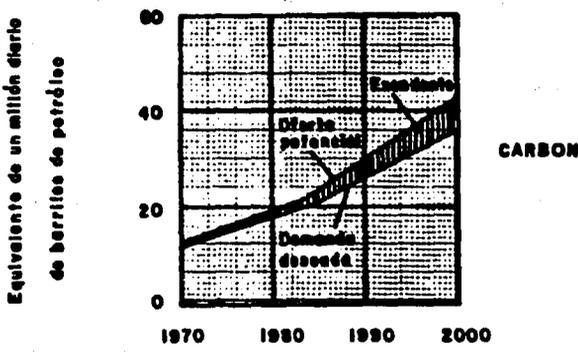


Figura 1.4

dado el relativo bajo costo y la seguridad registrada del funcionamiento de reactores y plantas nucleares hasta el momento. Sin embargo, el temor a los efectos que produciría la radioactividad, así como su potencial para la destrucción, ha creado en muchos países un rechazo al crecimiento de esta fuente de energía. Las fuentes renovables de energía tienen un papel muy importante que realizar, sobre todo después del año 2000, a medida que escasee el petróleo y el gas natural, muy especialmente si el carbón y la energía nuclear son obstaculizados en lo referente a recursos o por consideraciones de seguridad o del medio ambiente, (12).

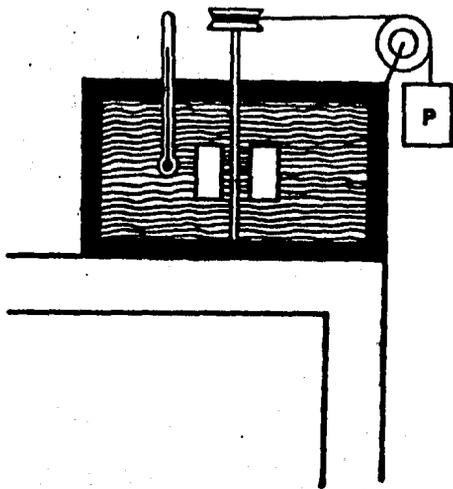
En México el uso de fuentes energéticas renovables en gran escala es un evento a futuro. A corto y medianos plazos su aportación al balance energético será marginal. No obstante la energía solar puede ayudar a mejorar las condiciones de vida y la producción en comunidades rurales no integradas al sistema eléctrico nacional. Asimismo tiene aplicaciones de gran importancia, como la llamada energía solar pasiva. A más largo plazo, si los esfuerzos tecnológicos en este campo tienen éxito, dicha fuente contribuirá a sentar las bases para el desarrollo de sistemas eléctricos descentralizados, (6).

## Capítulo II. Conceptos fundamentales.

### 1.-Energía.

La energía es un concepto primario que necesita de aceptar definiciones previas, como: trabajo, para que a partir de ésta definamos la energía.

Para la definición de trabajo, imaginemos que tenemos un recipiente cerrado que contiene un fluido. El recipiente se encuentra perfectamente aislado y la única comunicación con el exterior es a través de una polea que atraviesa la pared del recipiente y en el extremo interno se encuentra sujeto un agitador, el cual le puede comunicar movimiento al fluido. En el extremo externo se coloca una polea que puede ser movida por un cable enredado, en cuyo extremo se amarra un peso. Coloquemos un termómetro para conocer la temperatura del fluido en el interior del recipiente. Ahora leamos la temperatura y después permitamos que el peso descienda. Al haber descendido una altura  $h$ , podemos notar que la temperatura del fluido aumentó. Esto significa que el agitador ha modificado el estado en que se encontraba inicialmente el fluido. Ahora definiremos el concepto de trabajo, y diremos que es toda acción que causando el mismo efecto en el fluido del recipiente pueda ser substituida por el descenso del peso una altura  $h$ , (figura 2.1 ). Es decir, podemos colocar un motor eléctrico que consumirá energía eléctrica, una manivela y accionarla por la fuerza humana,



**Figure 2.1**

un resorte similar al de la cuerda de un reloj, etc. y cualquier mecanismo que pueda substituir la acción del peso descendiendo se dice que realiza trabajo.

Aceptando la definición de trabajo, diremos que energía es la capacidad que tiene un sistema de realizar trabajo. La energía es una propiedad del sistema mientras que el trabajo es una interacción del sistema con otro. Existen muchas formas de energía; las que son fácilmente identificables son la energía de movimiento o cinética y la energía de posición o potencial. Existe una energía de movimiento a una escala no apreciable sin microscopio, que podemos definir como energía interna, (13).

La expresión matemática de la energía de un material es:

$$E = KE + PE + U$$

donde KE y PE representan las energías cinética y potencial respectivamente, macroscópicamente observables del sistema; U representa la energía interna del sistema y está relacionada con las fuerzas y movimientos microscópicos de las moléculas que lo constituyen.

El cálculo de U en función de las condiciones o estados del sistema es uno de los problemas que se presentan en la termodinámica. Sin embargo un balance de energía de éste, suministra los medios para determinar el cambio de energía interna de un cuerpo a partir de datos macroscópicos, aplicando el principio de la conservación de la energía, (14). Es decir, podemos calcular la energía

interna aún sin, observarla.

a) Principio de la conservación de la energía

Este principio ha sido enunciado de la siguiente forma:

"la energía se puede transformar de una clase a otra, pero no es posible crearla ni destruirla".

Matemáticamente se expresa

$$0 = KE + PE + U$$

es decir, que la energía total -cinética mas potencial mas energía interna- no cambia.

Un cuerpo que se mueve sobre una superficie con la cual es apreciable el efecto de la fricción, se impulsa con una cierta velocidad, ésta decaerá en un determinado recorrido hasta pararse. Esto es porque la energía cinética del cuerpo cuando se impulsó, fue capaz de realizar trabajo en contra de la fricción. De esta manera desaparece la energía cinética para convertirse en energía interna, que puede manifestarse por un incremento en la temperatura de las superficies que rozan.

En otras interacciones puede producirse energía en forma de sonido, luz, electricidad, etc. Durante tales transformaciones se miden los cambios de energía interna en función del trabajo, porque es durante éstas transformaciones cuando se producen fuerzas y hacen trabajo, (15).

## b) Potencia.

La potencia se define como la rapidez con que se transfiere o se utiliza la energía y en consecuencia sus unidades son energía/tiempo. En el S.I. el watt es la abreviatura de J/s. El caballo de fuerza  $hp=0.7457 \text{ kw}$ .

## c) Unidades de energía y potencia.

En cualquier sistema de unidades, la energía tiene las dimensiones de fuerza por distancia. En el S.I. se usa el Joule (J) (Newton-metro (N-m)). Las de potencia son unidades de energía sobre tiempo. En el S.I. se usa el Watt ( $W=J/s$ ).

Existen diversas unidades de energía de las cuales daremos sus definiciones y respectivas equivalencias en el anexo, (12), (14) y (16).

## 2.- Transmisión de calor.

La transferencia de calor puede definirse como la transmisión de energía de una región a otra, esto es resultado de la diferencia de temperatura existente entre ellas, (17).

### a) Modos de transmisión de calor.

Básicamente existen tres modos diferentes de

transferencia de calor de un cuerpo a otro, llamados conducción, convección y radiación, (7).

#### a.1) Conducción

La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo sin desplazamiento directo de las moléculas que lo componen. La conducción es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos. Es también importante en fluidos, pero en estos, generalmente se combina con el movimiento de partículas de fluido y en algunos casos también con la radiación.

Fourier estableció que la rapidez del flujo de calor por conducción ( $q$ ) en un material, es igual al producto de las tres siguientes cantidades:

1. La conductividad térmica del material,  $k$ .
2. El área de la sección a través de la cual fluye el calor por conducción,  $A$  (área que debe ser medida perpendicularmente a la dirección del flujo de calor).
3. El gradiente de temperatura en la sección  $dT/dx$ , es decir, la rapidez de variación de temperatura  $T$  con respecto a la distancia  $x$  en la dirección del flujo de calor.

Para escribir la ecuación de conducción de calor en forma matemática, se debe anotar una convención de signos. Se especifica que la dirección en que aumenta la distancia  $x$  es la dirección del flujo de calor positivo. Entonces, puesto que de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el calor fluirá automáticamente desde los puntos de más alta temperatura a los puntos de más baja temperatura, el flujo de calor será positivo cuando el gradiente de temperatura sea negativo (figura 2.2).

En consecuencia la ecuación fundamental para conducción en una dimensión en estado estable se escribe:

$$q = - kA \frac{dT}{dx}$$

donde:

$q$  en J/hora

$A$  en  $m^2$

$\frac{dT}{dx}$  en  $^{\circ}C/m$

$k$  en  $J/hora\text{-metro}\text{-}^{\circ}C$

## a.2) Convección

La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. La convección tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o un gas.

La transferencia de calor por convección, se clasifica de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura, se habla de convección natural o libre. 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.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido.

La rapidez de calor transferido por convección entre una superficie y un fluido, puede calcularse por la relación propuesta por Newton:

$$q_c = hc A(T_2 - T_1)$$

donde:

$q_c$  = rapidez de calor transferido por convección en J/hora.

$A$  = área de transferencia de calor en  $m^2$

$(T_2 - T_1)$  = diferencia entre la temperatura de la superficie  $T_2$  y la temperatura del fluido  $T_1$ , en algún lugar específico (usualmente lejos de la superficie), en grados centígrados.

$hc$  = unidad de conductancia térmica promedio para

la convección (coeficiente de transferencia de calor en la convección), en  $J/s-m^2-^{\circ}C$ .

### a.3) Radiación

La radiación es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura, cuando estos están separados por un espacio que incluso puede ser el vacío.

La energía transmitida a través de un medio transparente (o a través del espacio) recibe el nombre de calor radiante, el cual es emitido por un cuerpo en forma de paquetes o cuantos de energía. El movimiento de calor radiante en el espacio es similar al de la propagación de la luz y puede describirse con la teoría ondulatoria. Cuando las ondas de radiación encuentran algún otro cuerpo su energía puede ser absorbida por éste. En el caso de los cuerpos opacos su energía se recibe en las partículas cercanas a la superficie y una parte es absorbida mientras el resto se refleja. En el caso de los cuerpos transparentes una parte importante de la radiación lo atraviesa, otra parte es reflejada en su superficie y el resto, que generalmente es una porción pequeña es absorbida por las partículas del cuerpo transparente (figura 2.3).

Como se mencionó anteriormente los materiales sujetos a la radiación no necesariamente absorben toda la energía

que incide en ellos . La fracción de energía incidente que ellos absorberán, será identificada como la absorptividad, ( $\alpha$ ). Parte de la energía incidente puede ser reflejada por el material cuando ésta alcance su superficie; ésta porción de la energía es la reflectividad, ( $\rho$ ). Una tercera porción será transmitida, sin que sea necesariamente primero transformada en calor. Esta parte de la energía es la transmitividad, ( $\tau$ ), (7).

En cuanto a la cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante, ésta depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie, (17). Se calcula con la siguiente expresión:

$$q_r = \sigma \epsilon A T^{**4}$$

en donde:

$\sigma$  = representa la constante de

Stefan-Boltzman =  $4.9 \text{ E-}08 \text{ kcal/hr}(\text{°K})^4$

$\epsilon$  = Emisividad de la superficie emisor

A = Area de la superficie emisora

T = Temperatura de la superficie

En cuanto a la energía reflejada, esta puede ser difusa, cuando la reflexión es independiente del ángulo incidente de radiación; o brillante, cuando el ángulo de reflexión con el que abandona la superficie es igual que

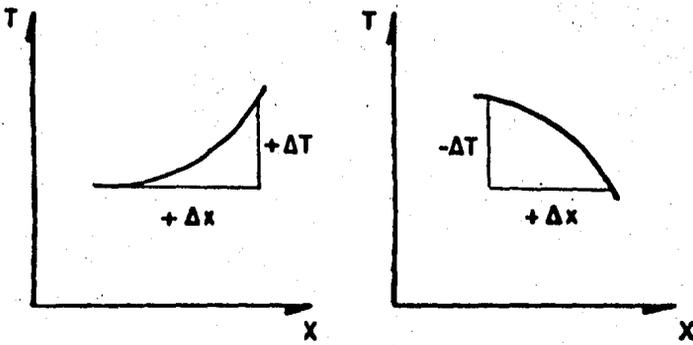


Figura 2.2

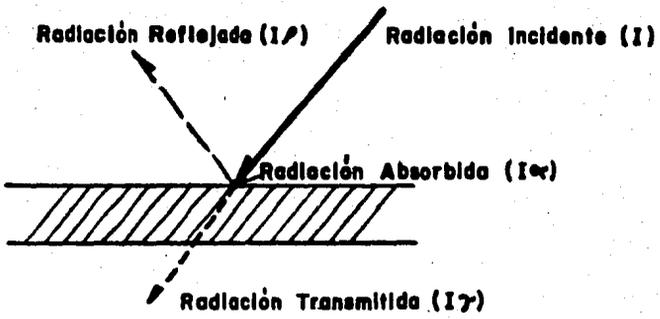


Figura 2.3

el de incidencia. La mayor parte de las superficies que se emplean en ingeniería muestran una combinación de ambos tipos de reflexión.

Con anterioridad se describieron los modos de transferencia de calor separadamente, sin embargo en la práctica el calor es usualmente transferido en pasos a través de un número de diferentes secciones conectadas en serie y la transferencia frecuentemente la efectúan dos mecanismos en paralelo para una sección dada del sistema.

A menudo es útil relacionar el flujo de calor con términos semejantes. El flujo de calor  $Q$  es similar a la corriente eléctrica, la diferencia de temperatura  $\Delta T$ , a la caída de voltaje. En consecuencia, la sección individual es análogo a una resistencia pura y el factor semejante a la resistencia eléctrica es la resistencia térmica, (14).

$$I = V / R \text{ (eléctrico)}$$

$$Q = \Delta T / R \text{ (térmica)}$$

para el caso de convección  $R_h = 1 / hc A$

para conducción  $R_k = L / k A$

La ecuación general de la rapidez del flujo de calor se puede expresar en términos de un potencial total de temperatura y de las características de transferencia de calor de secciones individuales de la trayectoria del flujo de calor, es decir:

$$Q = U A \Delta T \text{ (total)}$$

en donde  $U$ , representa una sola cantidad llamada unidad de conductancia total o coeficiente global de transferencia de calor. Para el flujo de calor a lo largo de una trayectoria formada de  $n$  secciones térmicas en serie, la conductancia total  $U$  es igual al recíproco de la suma de las resistencias de las secciones individuales, (17), o sea:

$$U A = 1 / (R_1 + R_2 + \dots + R_n) = 1 / R_{total}$$

El flujo de calor a través de varias secciones en serie como lo muestra la figura 2.4, se obtendría de la siguiente manera:

la resistencia total será:

$$R_{total} = 1/h_1 A + L_1/k_1 A + \dots + L_n/k_n A + 1/h_2 A$$

el flujo de calor es:

$$Q = (T_1 - T_2) / (1/h_1 A + \sum_{i=1}^n L_i/k_i A + 1/h_2 A)$$

pero  $A$  es factor común, y por otro lado como

$$U A = 1 / R_{total}, \text{ entonces la ecuación queda}$$

finalmente:

$$Q = U A \Delta T$$

En el caso que exista radiación y convección en una sección dada el flujo de calor se considera en paralelo (figura 2.5), en que:

$$Q_{total} = Q_h + Q_{rad}.$$

$$\text{donde } Q_h = \Delta T / R_h$$

$$\text{y } Q_{rad} = \sigma F_{1-2} A (T_p^{**4} - T_1^{**4}) \dots (1)$$

donde  $F_{1-2}$  es un módulo de corrección que está en función de los coeficientes de emisión y las geometrías relativas de los cuerpos reales.

La ecuación (1) se puede expresar en la siguiente

forma:

$$\text{Grad} = \frac{Q}{A} (T_p - T_1) p$$

donde

$$p = (T_p - T_1) (T_p^{**2} + T_1^{**2})$$

por lo que

$$\text{Grad} / \sigma \frac{Q}{A} p = T_p - T_1$$

de donde

$$\text{Rad} = 1 / \sigma \frac{Q}{A} p$$

Se puede observar que la resistencia térmica en el caso de radiación sí depende de la diferencia de temperaturas involucradas a diferencia de los casos de conducción y convección.

Por lo tanto se pueden presentar sistemas en los que se combinen los tres modos de transferencia de calor.

Hasta ahora hemos considerado que el flujo de calor se realiza sin existir almacenamiento de calor en los materiales a través de los cuales pasa dicho flujo, lo que generalmente no ocurre en la mayoría de los procesos de transferencia de calor. Por ejemplo, al final de un día caluroso el aire atmosférico llega a enfriarse y todavía las temperaturas dentro de los edificios permanecen bastante altas por varias horas después de la puesta del sol. En la mañana, aún cuando la atmósfera haya iniciado

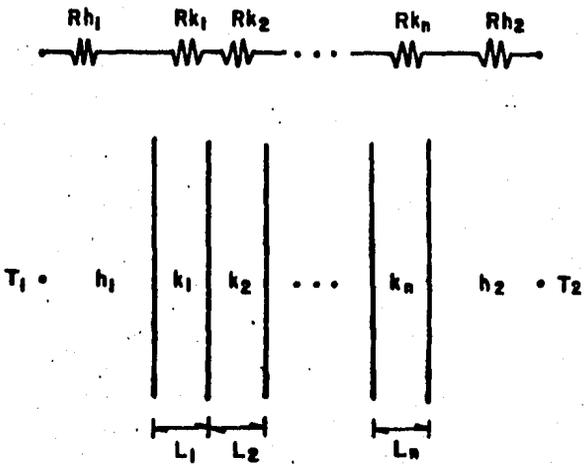


Figure 2.4

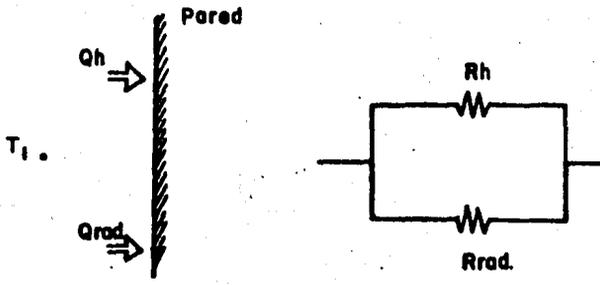


Figure 2.5

realmente su calentamiento, el aire dentro de los edificios permanecerá confortablemente frío por algunas horas. La razón de este fenómeno, es la existencia de un tiempo de retardo antes de que se alcance la temperatura de equilibrio entre el interior de los edificios y el medio exterior.

Para analizar este fenómeno, consideremos un sistema como el mostrado en la figura 2.6.

si para un tiempo  $t=0$  las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  son iguales, el flujo de calor se encuentra en estado permanente, figura 2.7.

si suministramos calor al fluido del lado izquierdo de tal manera que  $T_1 \gg T_2$ , y mantenemos  $T_2$  constante con un sistema de enfriamiento, para un  $t \neq 0$  pero  $t \ll \infty$ , encontramos que la energía necesaria para incrementar  $T_1$  no es la misma que la requerida para mantener  $T_2$  constante, debido a que la pared almacena calor, esto es a lo que llamamos flujo transitorio, figura 2.8.

para un tiempo suficientemente grande en que  $T_1$  alcanza su valor máximo, la pared ya no puede almacenar más calor y lo cede al sistema, con lo que se establece nuevamente un estado permanente, figura 2.9.

En el estado transitorio, la temperatura está en función del tiempo y del espacio en general. La

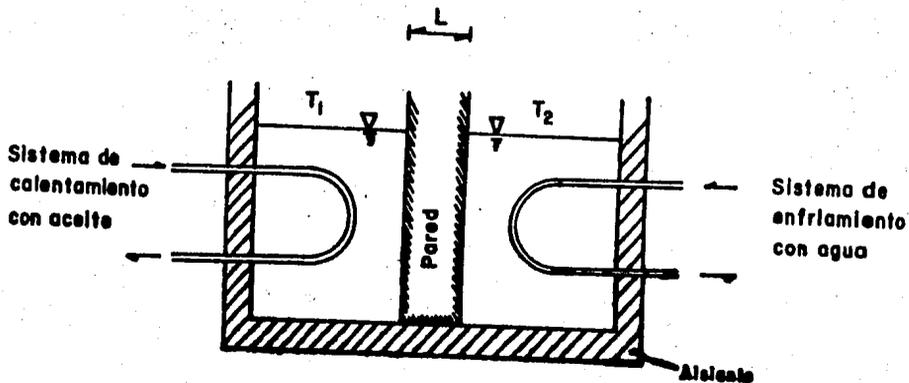


Figura 2.6

para  $t=0$   
 en donde  $Q_1=Q_2=0$

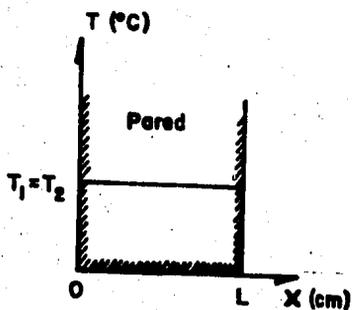


Figura 2.7

para  $t > 0$   
 $t < \infty$   
 en donde  $Q_1 > Q_2$

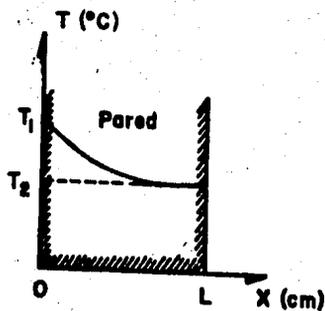


Figura 2.8

$t \gg 0$

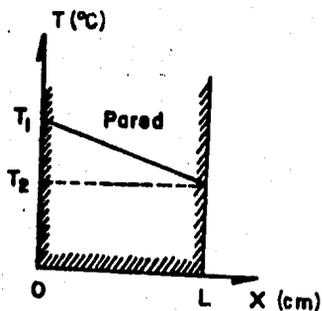


Figura 2.9

expresión resultante del balance del calor, tomando un elemento infinitesimal es:

$$(\partial T / \partial x)^2 = (\rho c_p / k) \partial T / \partial t \dots (1)$$

donde  $c_p$  = calor específico

$\rho$  = densidad del fluido

$k$  = coeficiente de conductividad

para el estado permanente el término  $\partial T / \partial t = 0$ , entonces la solución de la ecuación (1) es una línea recta:

$$T = C + Bx$$

donde para  $x = 0$  ;  $T = T_1$

y para  $x = L$  ;  $T = T_2$

por lo que

$$T_1 = C + B(0) ; T_1 = C$$

$$\text{y } T_2 = C + B(d) ; T_2 = T_1 + Bd ;$$

$$B = (T_2 - T_1) / d$$

y el flujo de calor sería:

$$Q = k A B = k A (T_2 - T_1) / d$$

La solución al flujo de calor en estado transitorio depende de las condiciones de frontera para cada caso específico.

En la edificación esas condiciones en el exterior estarán dadas principalmente por el clima: la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación solar. Salvo en algunos días en que hay cambios fuertes en primavera y en otoño en la temperatura, los días son bastante parecidos, es decir que hay cierta periodicidad de los días que va cambiando suavemente a lo largo del año. Al hacer una gráfica T-t las 24 horas del día, observamos ciertas fluctuaciones, figura 2.10.

porque la radiación solar tiene un cierto efecto sobre la temperatura. Todos estos fenómenos nos llevan a la solución de la ecuación (1) de la siguiente forma:

$$\text{Solución} = \text{Edo. Permanente} + \text{Edo. Transitorio}$$

Edo. Transitorio =

Parte transitoria periódica.

Parte transitoria de arranque

La parte de arranque se refiere al calor necesario para incorporar la temperatura de los materiales al medio, que en el caso de la construcción los materiales están inmersos en el clima por lo que nunca se inicia de hecho el arranque.

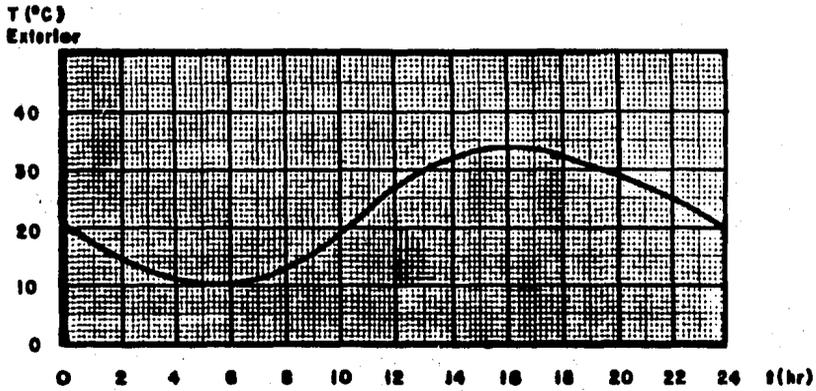
Las condiciones de frontera en el interior dependerán del uso que se le de al edificio y si el aire está acondicionado.

Si superponemos a la figura de  $T-t$  las fluctuaciones de temperatura en el interior, nos queda la figura 2.11.

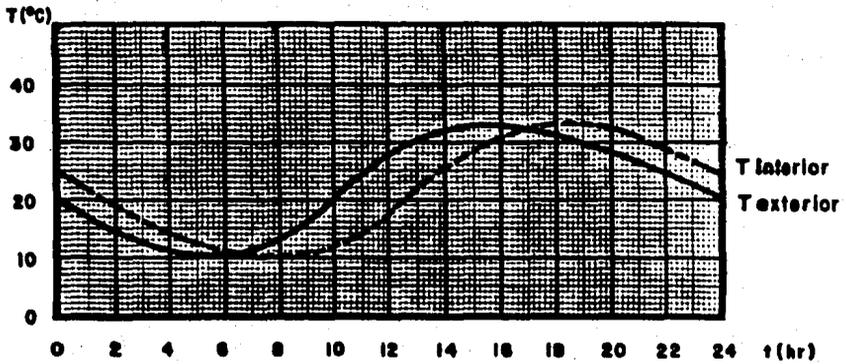
observamos que hay un defasamiento de temperatura y que no coinciden los máximos y los mínimos, esto se puede aprovechar para lograr mejores condiciones de confort o ahorro en el equipo de aire acondicionado si es que éste se requiere.

b) Transmisión de calor a través de techos, pisos y paredes.

Los techos, pisos y paredes, geoméricamente se



**Figure 2.10**



**Figure 2.11**

pueden aproximar a placas con caras paralelas. El flujo de calor a través de la placa como función de las temperaturas en ambas caras se cuantifica por la siguiente expresión:

$$q = k A dT/dx = ( k / e ) A ( T_i - T_e )$$

que es la ecuación de Fourier ( vista anteriormente en el punto 2 de este capítulo ). En donde  $T_i$  y  $T_e$  son las temperaturas en las superficies interior y exterior de la placa, pero en la práctica los datos que se tienen son las temperaturas del aire en contacto con las caras de la placa, por lo que se requiere cuantificar el flujo de calor como función de la temperatura del aire, utilizando la ecuación de convección:

$$q = h_c A \Delta T = h A ( T_p - T_a )$$

en donde  $T_p$  es la temperatura de la cara de la pared y  $T_a$  es la temperatura del aire ( ver capítulo II, 2.a ).

Si ahora consideramos una pared o techo compuesto de varios materiales y la temperatura del aire en contacto con cada cara no cambia con el tiempo, entonces no habrá almacenamiento de energía y el flujo de calor será:

$$Q = U A ( T_i - T_e ) \dots (1)$$

en donde como ya vimos,  $U$  está dada por:

$$1 / U = 1/h_i + \sum_{j=1}^M L_j / k_j + 1/h_e$$

la expresión (1) nos permite calcular el flujo de calor a través de paredes y techos del edificio debido a la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior.

En el caso de pisos donde se conoce la temperatura del subsuelo y el piso descansa directamente sobre éste, existe un coeficiente de conductancia del suelo que sustituye a  $1/h_e$  para el cálculo del flujo de calor. En suelos arenosos donde no existe corrientes subterráneas de agua, o donde la variación de la temperatura del suelo no es apreciable a lo largo del año, el flujo de calor del suelo se puede despreciar. Cuando exista un espacio de aire por debajo del piso, el cálculo se hace igual que para paredes y techos.

En el caso real de los edificios, la temperatura del aire varía por lo menos en un lado de la pared o techo a lo largo del día, por lo que la solución tendrá que ser diferente, ya que en este caso habrá almacenamiento de energía.

Si suponemos que la variación de la temperatura del aire se puede representar por una senoide se tiene:

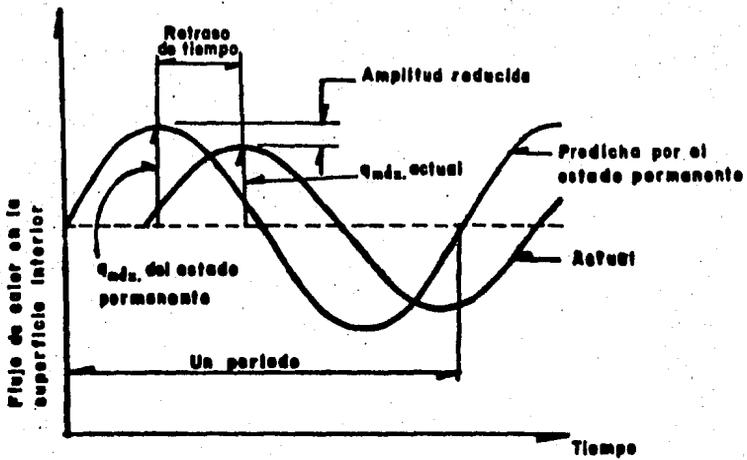
$$T_e = T_m + (T_{max} - T_{min}) \text{sen} (\omega t + \epsilon)$$

donde  $T_e$  es la temperatura del aire exterior,  $T_m$  es la media de la temperatura durante el día,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son la máxima y mínima temperatura del aire a lo largo del día,  $\omega$  es el ángulo que indica la rapidez de variación de la

temperatura en el día,  $t$  es el tiempo y  $\epsilon$  el ángulo de fase. La ecuación que representa el fenómeno se ve modificada por la presencia de la variación de las temperaturas en el tiempo y la solución de la ecuación de conducción de calor en éste caso adquiere formas diferentes a la obtenida sin almacenamiento de energía en el material, existen soluciones numéricas obtenidas en la computadora que muestran la variación tanto de la temperatura como del flujo de calor a lo largo del día. Estas soluciones se muestran en la figura 2.12 en la que se observa que el flujo de calor no es el mismo en ambas caras.

La diferencia que presenta el flujo en estado permanente a cuando varían las temperaturas del aire (estado transitorio) es debida sobre todo al almacenamiento de calor por el material de construcción y también a la conductividad térmica del material, pues esto nos indica la rapidez con que el flujo de calor es transmitido en el material y el almacenamiento de energía se lleva a cabo en capas de material no expuestas al aire. También es importante el coeficiente de convección, puesto que esto indica la rapidez con la que el calor se transmite del aire a la cara expuesta del material de construcción.

Este fenómeno nos permite obtener algunas ventajas del almacenamiento de calor en el material para obtener temperaturas de confort en las edificaciones, (13).



**Comparación del flujo de calor actual y el flujo calculado con la ecuación del estado permanente.**

**Figura 2.12**

c) Transmisión de calor a través de ventanas.

En el caso de ventanas que estén compuestas de material transparente, la transferencia de calor es diferente al de las paredes, pisos y techos.

El flujo de calor se presenta en forma combinada por conducción y radiación, lo cual se puede apreciar en la figura 2.13, en la que la radiación incidente  $I$  se descompone en la radiación reflejada  $I\rho$ , radiación absorbida  $I\alpha$ , y la transmitida  $I\tau$  ( donde  $\rho + \alpha + \tau = 1$  ), esta última no necesariamente calienta al aire en primera instancia sino que calienta a las superficies interiores y después éstas calientan al aire. La parte absorbida de la radiación entra al sistema por contacto directo con el aire.

La conducción se presenta en forma similar a una pared, el calor es transmitido primero por convección, después es conducido a través del vidrio para entrar al sistema por convección del aire interior. Es importante señalar que en las ventanas dado el pequeño espesor, el coeficiente global de transmisión de calor es grande comparado con el de la pared o techo. El flujo por conducción a través de ellas se puede analizar mediante la analogía del circuito eléctrico, en que se tiene un circuito de resistencias en serie o en paralelo.

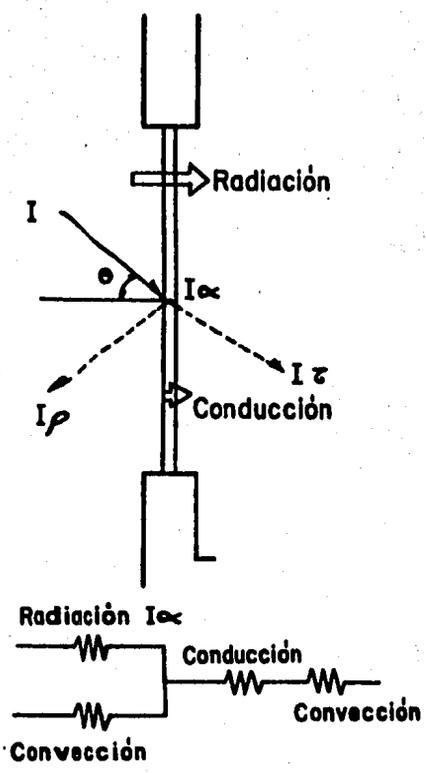


Figura 2.13

$$Q \text{ (entra)} = Q \text{ (rad.solar)} + Q \text{ (cond.)}$$

donde

$$Q \text{ (rad.solar)} = I \tau A \text{ (ventana)} \cos \theta$$

$$Q \text{ (cond.)} = U A (T_e - T_i)$$

$$U = 1 / (1/h_e + L_v/k_v + 1/h_i)$$

### 3.- Enfriamiento evaporativo.

El aire se compone de gases, vapores y sólidos; los gases son una mezcla de nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%) y argón y bióxido de carbono (1%); los vapores aunque están formados por distintas sustancias en las ciudades, consideraremos que únicamente están compuestos de agua; los sólidos son polvo, cenizas, minerales, microorganismos, humos de ácidos y sulfuros, etc.

Para nuestro análisis despreciaremos el contenido de sólidos en el aire, es decir:

$$\text{aire} = \text{gases } (N_2 + O_2) + \text{vapor de agua } (H_2O)$$

Las mezclas de vapor-aire se rigen prácticamente por la ley de Gibbs-Dalton.

De esta ley se sigue que cualquier mezcla de gases

ejerce una presión total igual a la suma de las presiones parciales ejercidas independientemente por cada gas.

El aire atmosférico existe a una presión total igual a la presión atmosférica ( $P_b$ ), la cual es:

$$P_b = P_n + P_o + P_v = P_a + P_v$$

donde:

$P_n$  = es la presión parcial del nitrógeno.

$P_o$  = es la presión parcial del oxígeno.

$P_v$  = es la presión parcial del vapor de agua.

$P_a$  = es la presión parcial del aire seco.

En la expresión anterior se llama aire seco a la mezcla de nitrógeno más oxígeno.

La máxima cantidad de vapor que puede existir en el aire depende de la temperatura y presión del aire que pueden existir simultáneamente en el espacio.

Esta cantidad de vapor existe cuando el espacio está saturado, es decir, cuando la presión parcial del vapor corresponde a la temperatura de saturación. En estas condiciones, si se atomiza agua en dicho espacio, permanecerá en estado líquido. Si el espacio se enfría, empezará la condensación.

Las propiedades de la mezcla de aire con vapor saturado se pueden representar mediante un diagrama psicométrico,

que muestra, la relación entre las cinco siguientes propiedades del aire:

a) **Temperatura de bulbo húmedo (TBH).** Indica la cantidad de calor total contenido en el aire. Se determina cubriendo el bulbo de un termómetro con una gasa húmeda, y haciendo pasar aire a través de ésta; en esta forma la humedad comienza a evaporarse. La temperatura del agua y del aire circundante baja proporcionalmente a la evaporación ocurrida.

Si está seco el aire que rodea al termómetro, la evaporación es grande al igual que el descenso de temperatura.

Si el aire está saturado, no habrá evaporación ni bajará la temperatura.

El calor necesario para causar la evaporación de la manera descrita anteriormente se toma del calor sensible que contiene el agua depositada en la gasa disminuyendo en temperatura. Durante el proceso de evaporación el calor sensible se transforma en calor latente de vaporización pero el calor total del sistema permanece igual y la temperatura de bulbo húmedo es constante.

b) **Temperatura de rocío.** Indica la cantidad de humedad contenida en el aire. Es la temperatura a la cual el aire se satura cuando se enfría, suponiendo que no hay aumento ni disminución de humedad.

La temperatura de rocío de cualquier mezcla de aire y vapor de agua se puede determinar de la siguiente manera:

b.1) Enfriando poco a poco un recipiente que contenga aire, la temperatura a la que la condensación empieza a aparecer en las paredes del recipiente es la temperatura de rocío.

b.2) La temperatura de rocío se puede encontrar psicométricamente partiendo de la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco.

c) Temperatura de bulbo seco (TBS). Es la que se mide con un termómetro ordinario, y es la medida del calor sensible del aire.

d) Humedad relativa ( $\phi$ ). Se define como la relación de la presión parcial del vapor en el aire con la presión de saturación del vapor correspondiente a la temperatura existente. O bien, es la relación de la densidad del vapor de agua en el aire con la densidad de saturación a la temperatura correspondiente.

$$\phi = (P_v / P_d) \times 100 = (d_v / D_d) \times 100$$

en donde:

$P_v$  = presión de saturación del vapor de agua

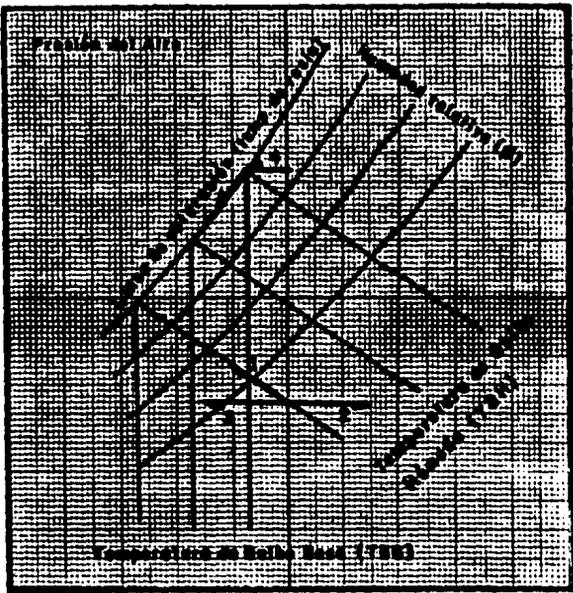
$D_d$  = densidad del vapor saturado.

e) Humedad específica ( $W_v$ ). Es el peso de vapor de agua expresado en kilogramos por kilogramo de aire seco.

Cuando se conocen dos de éstas propiedades, las demás se encuentran fácilmente utilizando el diagrama psicométrico; éste varía para cada presión atmosférica.

El diagrama parte de la línea de saturación, o sea, a cada temperatura de bulbo seco corresponde cierta cantidad de humedad para que haya saturación; por lo tanto, si en las abscisas se representan las temperaturas y en las ordenadas las unidades específicas, la línea de saturación tiene la forma representada en la figura 2.14.

El fenómeno del enfriamiento evaporativo es aquel en el que se incorpora humedad al aire en forma natural o artificial (humidificadores), es decir que cuando la humedad relativa es baja, el aire tiene la capacidad de tomar humedad y en dicho proceso hay una transformación del calor sensible del agua en calor latente de vaporización, dando lugar a un enfriamiento. Esto lo podemos apreciar en el proceso 1 de la figura. En el caso 2, la temperatura del aire se incrementa sin existir un cambio en el contenido de humedad, por lo tanto la humedad relativa disminuye y hay calentamiento. En el caso 3 la temperatura del aire disminuye, sin variar la humedad por lo tanto existe un enfriamiento. En el caso 4 al disminuir la temperatura hasta la línea de saturación no hay cambio de humedad; pero si continuamos disminuyéndola se condensa el vapor de agua, (18).



Wv contenido de humedad  
(Kg de agua/Kg de aire seco)

T (°C)

Figura 2.14

En el cuerpo humano también se presenta el efecto del enfriamiento evaporativo como un mecanismo de regulación de la temperatura interior (este fenómeno se analizará con más detalle en el siguiente inciso)

Para climas cálidos, en donde es necesario el enfriamiento para mantener el confort de los ocupantes, se requiere que el aire del interior se mantenga fresco o que exista una corriente de aire circulando por el interior de la habitación para que el cuerpo humano pierda calor por contacto directo. Esto no siempre se puede lograr en climas cálidos con un sistema pasivo. Es necesario que las condiciones del clima lo permitan. La temperatura del medio ambiente que es oscilante, deberá tener un promedio cercano a la temperatura de confort.

El empleo de materiales higroscópicos y/o el uso de mecanismos humidificadores (por ejemplo se puede modificar el clima que circunda a la edificación mediante el empleo de Jardines en que se puedan colocar Jardineras elevadas de piedra y que se encuentren del lado que proviene el viento dominante) en climas cálidos, es una aplicación del efecto de enfriamiento evaporativo.

#### 4.- Balance térmico del cuerpo humano.

El cuerpo humano genera calor constantemente como producto secundario de las reacciones metabólicas celulares, y pierde calor permanentemente, que pasa al medio ambiente.

La figura 2.15 muestra el equilibrio que existe entre producción y pérdida de calor.

En promedio, el 55% de la energía de los alimentos se transforma en calor durante la formación de ATP (Trifosfato de Adenosina). Otra parte de la energía del trifosfato de adenosina se transforma en calor cuando se cede a los sistemas metabólicos celulares; finalmente el metabolismo celular solo aprovecha el 25% de la energía.

Todavía se transforma en calor la mayor parte de ese 25% de la energía inicial: síntesis de proteínas, energía de la contracción muscular, bombeo de sangre por el corazón, etc.

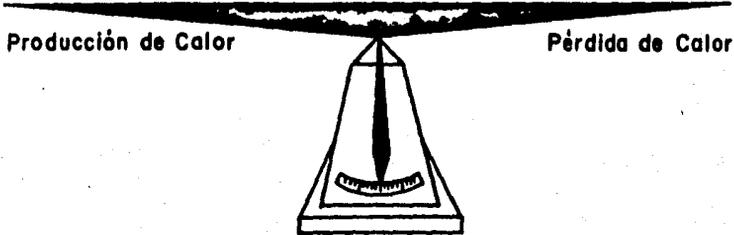
Por lo tanto, podemos decir que prácticamente toda la energía producida por el metabolismo de los alimentos en el organismo se convierte en calor. La única excepción es la realización de un trabajo exterior por los músculos.

Los medios por los que el organismo pierde calor se indican en la figura 2.16.

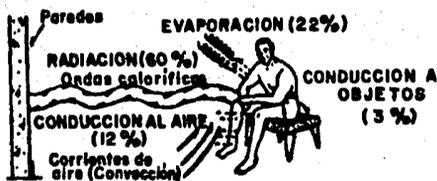
La cantidad de calor perdida por cada uno de estos mecanismos varía considerablemente según las condiciones atmosféricas. En una habitación a temperatura normal el

- 1.- Metabolismo basal.
- 2.- Actividad muscular.  
-escalofrío-
- 3.- Efecto de la tiroxina  
sobre las células.
- 4.- Efecto de la adrenalina  
sobre las células.
- 5.- Efecto de la temperatura  
sobre las células.

- 1.- Radiación.
- 2.- Evaporación.  
-convección-
- 3.- Conducción  
-convección-



**Figura 2.15**



**Mecanismos de pérdida de calor.**

**Figura 2.16**

cuerpo desnudo elimina el 60% de la pérdida total de calor por radiación.

El cuerpo radía calor en todas direcciones, a la vez una radiación térmica llega al cuerpo, que proviene de las paredes y de otros cuerpos que la dirigen hacia el organismo. Si la temperatura del cuerpo es mayor que la temperatura del medio que lo rodea, pasará una cantidad de calor mayor desde el cuerpo hacia afuera que en sentido opuesto.

El calor perdido por radiación varía en proporción directa de la diferencia entre las cuartas potencias de: 1) la temperatura de la superficie corporal, y 2) la temperatura media del ambiente. Por lo tanto, es imposible afirmar en forma exacta cual porcentaje del calor corporal se perderá por irradiación, a menos que se definan todas las condiciones que en el momento determinado rodean al cuerpo.

La superficie del cuerpo humano absorbe extraordinariamente los rayos caloríficos.

Generalmente solo se pierden pequeñas cantidades de calor del cuerpo por conducción directa desde la superficie corporal a los demás objetos como sillas, camas, etc.

Por otra parte la pérdida de calor por conducción hacia el aire representa una porción considerable del calor perdido por el cuerpo, incluso en condiciones normales. El movimiento vibratorio de las moléculas de la

piel puede aumentar el movimiento de las moléculas del aire que entran en contacto directo con ella. Sin embargo una vez que la temperatura del aire inmediatamente vecino de la piel, resulta igual a la temperatura de ésta, ya no hay intercambio de calor desde el cuerpo hacia el aire. Por lo tanto, la conducción de calor del cuerpo al aire termina automáticamente a menos que éste se desplace de manera que quede aire nuevo no calentado que esté constantemente en contacto con la piel, presentándose de esta manera el fenómeno de la convección. En la figura 2.16 se puede apreciar que una persona desnuda sentada en una habitación de temperatura agradable, sin corrientes de aire, pierde el 12% aproximadamente de su calor por convección.

Cuando el cuerpo queda expuesto al viento, la capa de aire inmediatamente vecina de la piel es sustituida por aire nuevo mucho más rápidamente que en condiciones normales, por tanto, aumenta en forma correspondiente la pérdida de calor por convección. El efecto de enfriamiento del viento a baja velocidad es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del mismo, por ejemplo: un viento de 6 Km/hora es unas dos veces más eficaz para enfriar que un viento de 1.5 Km/hora. Sin embargo, cuando la velocidad del viento pasa de unos cuantos kilómetros por hora ya no se produce enfriamiento adicional en grado considerable sea cual sea la velocidad, una vez que el viento ha enfriado la piel hasta la temperatura del propio aire. Por lo contrario, la velocidad con la cual el calor puede pasar de la parte

central del cuerpo a la piel es entonces el factor que rige la rapidez con la cual puede perderse calor.

Cuando el agua se evapora de la superficie corporal, se pierden 0.58 kcal por cada gramo de agua evaporada y el agua se evapora insensiblemente de la piel y los pulmones. Ello provoca una pérdida continua de calor del orden de 12 a 18 kcal por hora. Esta evaporación insensible de agua no se puede controlar para regular la temperatura, pero la pérdida de calor por evaporación se puede moderar regulando la intensidad del sudor, como se va a ver posteriormente.

Cuando la temperatura del medio es mayor que la de la piel, en lugar de perder calor el cuerpo lo gana por radiación y conducción procedente del medio vecino. En tales circunstancias, el único medio por virtud del cuál el cuerpo puede perder calor es la evaporación.

El clima húmedo tiene influencia sobre la pérdida de calor por evaporación. Los días de verano calientes y húmedos son muy molestos, entonces el sudor corre por la superficie corporal mas profusamente que en estado normal, ocurre así por que el aire ya está humedecido casi hasta la saturación. Por lo que la intensidad de evaporación puede estar considerablemente disminuida, o totalmente anulada de manera que el sudor secretado persiste en estado líquido. Así la temperatura del cuerpo se acerca a la temperatura del medio, o se eleva por encima de ella a pesar de que el cuerpo sigue sudando.

La falta de movimiento del aire evita la evaporación de la misma manera que el enfriamiento eficaz por conducción de calor hacia el aire.

Los vestidos aprisionan capas de aire junto a la piel y en la textura de la ropa, por lo cual aumenta el espesor de la zona aislada y disminuyen las corrientes de convección. Por lo que la intensidad de pérdida calorífica del cuerpo por conducción disminuye considerablemente. La mitad, aproximadamente, del calor transmitido desde la piel a los vestidos probablemente se pierda por radiación en ellos, en lugar de ser transmitido a través de los espacios pequeños que quedan. La eficacia del vestido para evitar la pérdida de calor desaparece casi completamente cuando el tejido de la ropa se humedece, pues el aire aprisionado actúa como aislante, de hecho, los intersticios del vestido quedan llenos de agua, que a consecuencia de su elevada conductividad para el calor, aumenta la intensidad de la transmisión calorífica 20 veces o más que cuando permanece seca.

El vestido que es permeable para la humedad permite una pérdida casi normal de calor por el cuerpo, gracias a la evaporación; cuando hay producción de sudor, el propio sudor puede empapar el vestido y se produce la evaporación no en la piel sino en la superficie del vestido. Ello enfría el vestido, lo cual, a su vez, significa enfriar la piel.

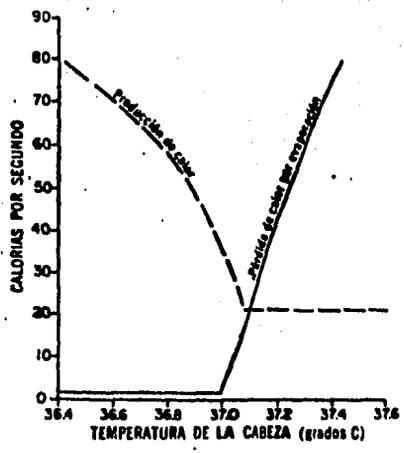
La temperatura del organismo es conservada por un

centro de regulación, situado en el hipotálamo, entre los límites de 36.5 y 37.5 grados Centígrados en forma indefinida en un medio variante que va desde los 15.5 hasta los 55 grados Centígrados. La piel, el tejido subcutáneo, y especialmente la grasa de los tejidos subcutaneos, son aislantes eficaces para conservar el calor del cuerpo, que se produce en las partes más profundas del organismo.

Cuando el cuerpo se calienta excesivamente, se secretan grandes cantidades de sudor hacia la superficie de la piel por las glándulas sudoríparas, con el fin de permitir un rápido enfriamiento por evaporación corporal, como lo muestra la figura 2.17, en la que la curva continúa muestra que casi a la temperatura de 37 ° C empieza la sudación, aumentando rápidamente cuando la temperatura se eleva más.

Por otra parte, el sudor cesa a cualquier temperatura por debajo de este valor crítico. A cualquier temperatura debajo de 37 grados centígrados son activados intensamente diversos mecanismos que aumentan la producción de calor, según lo muestra la curva discontinua, especialmente el aumento de actividad muscular que culmina en escalofríos.

Además del mecanismo termostático para el control de la temperatura corporal, el cuerpo tiene otro mecanismo destinado al mismo fin y más potente todavía, que consiste en el control de conducta del individuo en relación a la temperatura, que puede explicarse así: siempre que la temperatura se eleva demasiado, señales provenientes del



**Figura 2.17**

área preóptica del encéfalo proporcionan la sensación psíquica de un exceso de calor.

Cuando el cuerpo se enfría demasiado, señales provenientes de la piel y posiblemente de otros receptores nerviosos periféricos provocan la sensación de frío molesto. Por lo tanto, la persona efectúa ajustes adecuados del ambiente para restablecer su sensación de bienestar y confort en ambos casos.

Los tipos evidentes de ajuste de conducta incluyen: selección de vestidos, desplazamiento del cuerpo hacia un ambiente diferente, aumento de calor o de frío proporcionado por calentadores adecuados o por acondicionadores de aire, etc., (19).

#### 5.- Balance térmico de un sistema.

La transmisión de calor como se ha visto hasta ahora se efectúa de los lugares más calientes a los más fríos. Esto aplicado a las edificaciones nos lleva a considerar dos casos: el primero, cuando la edificación está más caliente que el medio exterior (que ocurre en invierno generalmente), en donde hablaremos de la carga de calor; y el segundo, cuando el medio exterior está más caliente que la edificación (que por lo general ocurre en primavera y verano), en donde hablaremos de la carga de enfriamiento.

### **Carga de Calor:**

Consiste en una estimación del calor perdido máximo probable de cada cuarto o espacio para ser calentado mientras se mantiene una temperatura del aire interior durante períodos de diseño en condiciones de clima externas. Las pérdidas de calor son principalmente:

- Pérdidas por transmisión a través de la envoltura (paredes, pisos, ventanas, techos u otras superficies)

- Pérdidas por infiltración, o energía necesaria para calentar el aire exterior, por fugas a través de cuarteaduras y grietas alrededor de puertas y ventanas abiertas.

### **Carga de Enfriamiento:**

Es la estimación del calor que debe removerse del lugar para mantener la temperatura en un valor constante. La suma de todo el calor ganado instantáneamente en el lugar a un tiempo dado no es necesariamente igual a la carga de enfriamiento para el espacio a ese mismo tiempo. La ganancia de calor por radiación del espacio es particularmente absorbida por las superficies y objetos del lugar y no afecta al aire del cuarto hasta tiempo después. La ganancia de calor puede ser sensible cuando hay una

adición directa del calor para el lugar acondicionado por algún o todos los mecanismos de conducción, convección y radiación. Sera latente cuando el agua se incorpore al medio ambiente por un cambio de fase sin que exista para ello un cambio en la temperatura (por ejemplo el vapor emitido por los ocupantes).

Las ganancias de calor se clasifican en:

- Radiación solar a través de superficies transparentes.

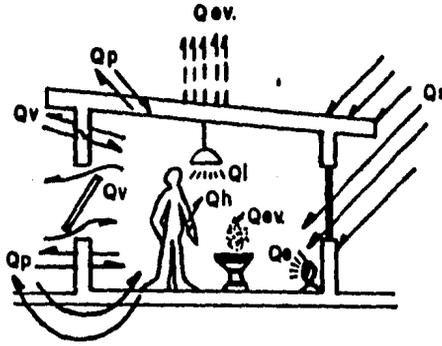
- Conducción de calor a través de paredes exteriores y techos.

- Conducción de calor a través de divisiones interiores, techos y pisos.

- Calor generado por ocupantes, luces e instrumentos.

- Energía transferida como resultado de ventilación e infiltración del aire exterior.

El balance térmico de un sistema o edificación se presenta en la figura 2.18., (20).



**Figura 2.18: Balance térmico de una edificación**

Flujo a través de las paredes, pisos y techos:

$$Q_p = U A_e (T_{\infty} - T_i)$$

Carga por iluminación:

$$Q_i = \Sigma \text{Pot. lámparas}$$

Carga por equipo:

$$Q_e = \Sigma \text{Pot. equipo}$$

Carga por radiación solar:

$$Q_s = A_{\text{ventana}} \cdot I_{\text{cos } \theta} + A_{\text{pared y techo}} \cdot I_{\text{cos } \theta_{\text{ax}}}$$

Carga por ocupantes:

$$Q_h = \text{No. de personas} \cdot \text{Calor generado}$$

Flujo por infiltración:

$$Q_v = N \cdot \text{Vol. de la habitación} \cdot \rho \cdot C_p (T_{\infty} - T_i)$$

Se encuentra en balance térmico si:

$$Q_i + Q_s \pm Q_p \pm Q_v \pm Q_e + Q_h - Q_{ev} = 0$$

### Capítulo III. Usos de la energía solar.

#### Introducción:

A diferencia de cualquier fuente de energía, la energía solar se caracteriza por su variabilidad. Independientemente de la demanda, los sistemas que funcionan con base en energía solar están sujetos a fluctuaciones de la radiación solar debido a las variaciones astronómicas así como a las diversas condiciones meteorológicas. De ahí que para una adecuada planeación de proyectos para el uso de la energía solar, sea deseable el contar con datos confiables de la radiación que se recibe en la superficie terrestre, tanto de su magnitud como de su variación espacial y temporal.

Desde luego que los mejores datos a utilizar son los medidos experimentalmente en el sitio propuesto para la localización del sistema, pero desgraciadamente no siempre es posible obtener dicha información, en gran parte debido a que las estaciones piroheliométricas son pocas, algunas de ellas localizadas en una misma región. Particularmente en la República Mexicana, podría decirse que no existe una red solarimétrica. Se ha venido realizando trabajo consistente en este sentido por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., desde hace algunos años. En 1979 el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.

instaló una red solarimétrica de cinco estaciones. Desafortunadamente no ha sido posible establecer una operación continua de los instrumentos quedando actualmente en funcionamiento sólo dos de ellas. En algunas otras localidades del país se encuentran instalados instrumentos para el registro de la radiación solar que son manejados por diversas instituciones para fines específicos, lo que trae como consecuencia que la información recopilada no sea reportada. Es decir, no existe un control o bien una institución que regule la operación de estas estaciones; y aún así las observaciones por si mismas están sujetas a error. Por estas razones es deseable entonces contar con procedimientos de cálculo los cuales puedan ser usados para prever las estimaciones a lugares donde las mediciones no se hacen y para lugares en donde hay interrupciones en los registros de mediciones.

Ante el gran desarrollo que han tenido los modelos matemáticos para la cuantificación de la radiación solar, se abre entonces la posibilidad de que los valores calculados de la magnitud de la radiación solar, puedan llegar a ser más precisos que los valores medidos por instrumentos calibrados, mantenidos u operados inapropiadamente. Una adecuada estimación siempre será mejor que un mal registro. Lo anterior no debe confundirse con un rechazo de la conveniencia de la medición solarimétrica, no debe olvidarse que toda estimación

requiere verificación experimental antes de aceptarse como válida.

En la referencia (21) se hace una presentación, discusión y evaluación de procedimientos para estimar la radiación solar a partir de información recopilada.

La energía solar que incide sobre la superficie terrestre se puede convertir en energía útil (calorífica, mecánica o eléctrica) mediante muy diversas tecnologías.

Las características importantes de la energía solar que hay que tener en cuenta para su aprovechamiento son: su distribución geográfica; su baja densidad energética comparada con las fuentes convencionales; y su carácter intermitente, con variaciones diarias y estacionales y las debidas a las condiciones atmosféricas prevaletientes, (6).

Si consideramos al sol como un cuerpo negro, con una temperatura media, T de 5762 grados Kelvin, siendo su radio  $R = 6.95 \text{ E} + 08 \text{ km}$  y la distancia de la tierra al sol (media) de  $D = 149.5 \text{ E} + 06 \text{ km}$ , la energía emitida según la ley de Stefan-Boltzman es:

$$E = 4\pi R^2 T^4$$

siendo  $\sigma = 4.9 \text{ E} - 08 \text{ kcal/hr}(\text{°K})^4$

por lo tanto  $E = 3.2785 E + 26 \text{ kcal/hr}$

Si consideramos una esfera que tenga como centro el sol y de radio la distancia tierra-sol (D), obtendremos una energía por unidad de superficie:

$$I = 1167.28 \text{ kcal/hr-m}^2$$

Mediciones más exactas tomadas con satélite proporcionan una constante solar media de

$$I = 1163 \text{ kcal/hr-m}^2 = 1.353 \text{ Kw/m}^2$$

A este valor se le denomina constante solar y es la energía recibida del sol en un área unitaria expuesta perpendicularmente a sus rayos, a una distancia promedio del sol a la tierra y en ausencia de la atmósfera terrestre, (6).

Ahora bien, como la distancia del sol a la tierra varía de  $147 E + 06 \text{ km}$  (perihelio) a  $152 E + 06 \text{ km}$  (afelio) según la época del año, la constante solar variará según el día del año n en:

$$I' = I (1 + 0.033 \cos 360 n / 365)$$

donde  $I'$  es la constante solar corregida según el día del año (figura 3.1), (4).

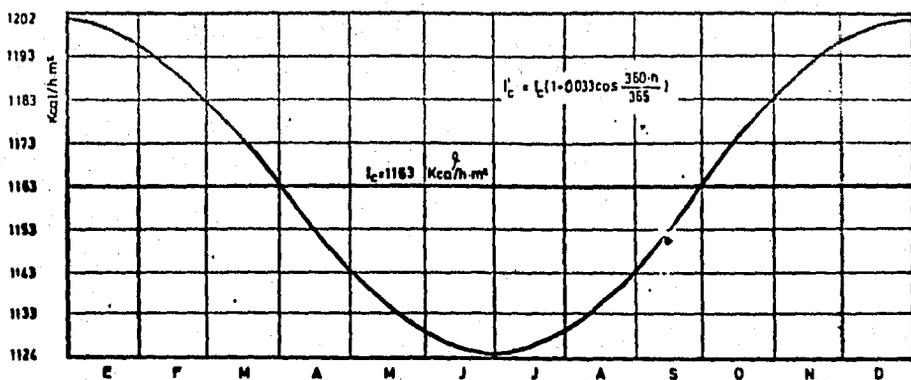


Figura 3.1 VARIACION DE LA CONSTANTE SOLAR

## 1.- Captación.

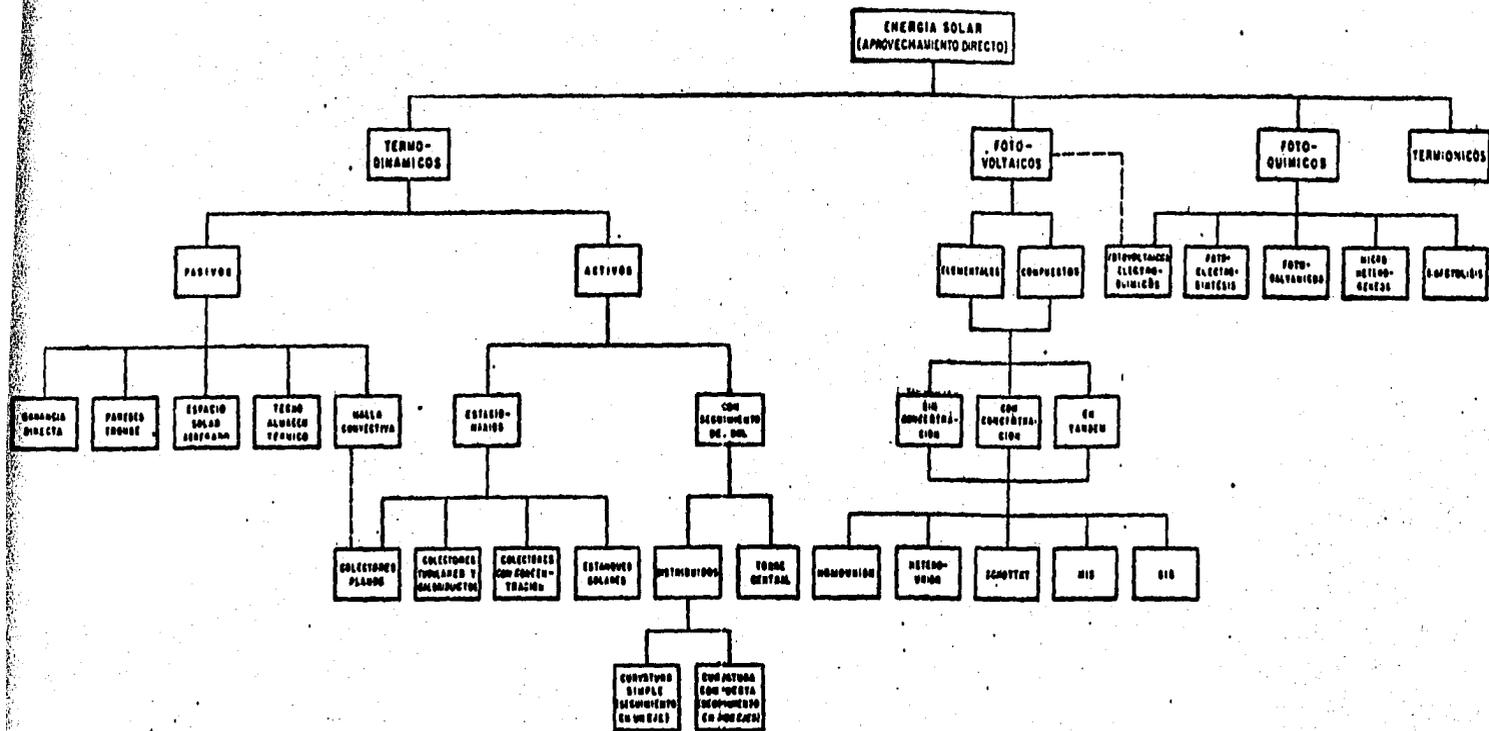
La energía solar como tal, no es utilizable y tenemos que convertirla a un tipo de energía adecuada a nuestras necesidades. Esta conversión se lleva a cabo en un captador que en términos generales es un elemento que se encuentra expuesto a la radiación solar, capaz de recoger dicha radiación, transformándola en un tipo de energía utilizable, (4).

Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar son muchas y muy variadas; sus ventajas y desventajas dependen en buena medida de la aplicación y uso final de la energía.

Según el proceso de conversión de energía solar a energía útil, consideraremos cuatro grandes grupos de tecnologías: a) Procesos termodinámicos (por calentamiento), b) Sistemas fotovoltaicos, c) Procesos fotoquímicos y d) Procesos termiónicos.

Para cada uno de los cuatro procesos de conversión se pueden analizar diferentes tecnologías clasificadas en el cuadro 3.1.

Algunos autores consideran que la mayor parte de las tecnologías solares, no son todavía alternativas realmente viables aún frente a los actuales precios del mercado mundial de los combustibles convencionales. La mayoría señala sin embargo como excepción a algunas de ellas entre las que se encuentran: los colectores planos para



Cuadro 3.1. Tecnologías para el aprovechamiento directo de la energía solar

calentamiento de agua (de tipo termosifónico, sin bombas, controladores o mantenimiento); los sistemas térmicos pasivos (generalmente vinculados con la helioarquitectura); los colectores planos (para aire) asociados con sistemas para secar diferentes materiales orgánicos; las celdas fotovoltaicas para aplicaciones en lugares muy alejados de las redes de distribución de energía eléctrica y que requieren de pequeña capacidad de potencia instalada.

Las superficies de captación y absorción de la energía solar son elementos comunes a todos los dispositivos térmicos solares. En algunos casos un solo material capta y absorbe la energía solar (por ejemplo, en los colectores planos); en otros, un espejo capta la radiación solar y la refleja hacia la superficie donde es absorbida.

#### a) Procesos termodinámicos (conversión térmica)

La conversión termodinámica, ha sido sin duda el proceso de aprovechamiento más estudiado y explotado desde la antigüedad. Se trata en esencia de colocar expuesta a la radiación solar (directa o reflejada) una superficie (colector-absorbedor) que, por efecto de la radiación que recibe aumenta su temperatura. El calor así ganado es transferido a un fluido (aire, agua, aceites, fluidos de alto peso molecular) que es empleado para proporcionar energía útil (calorífica, mecánica, eléctrica, o producción de combustibles). En la figura 3.2 se muestran

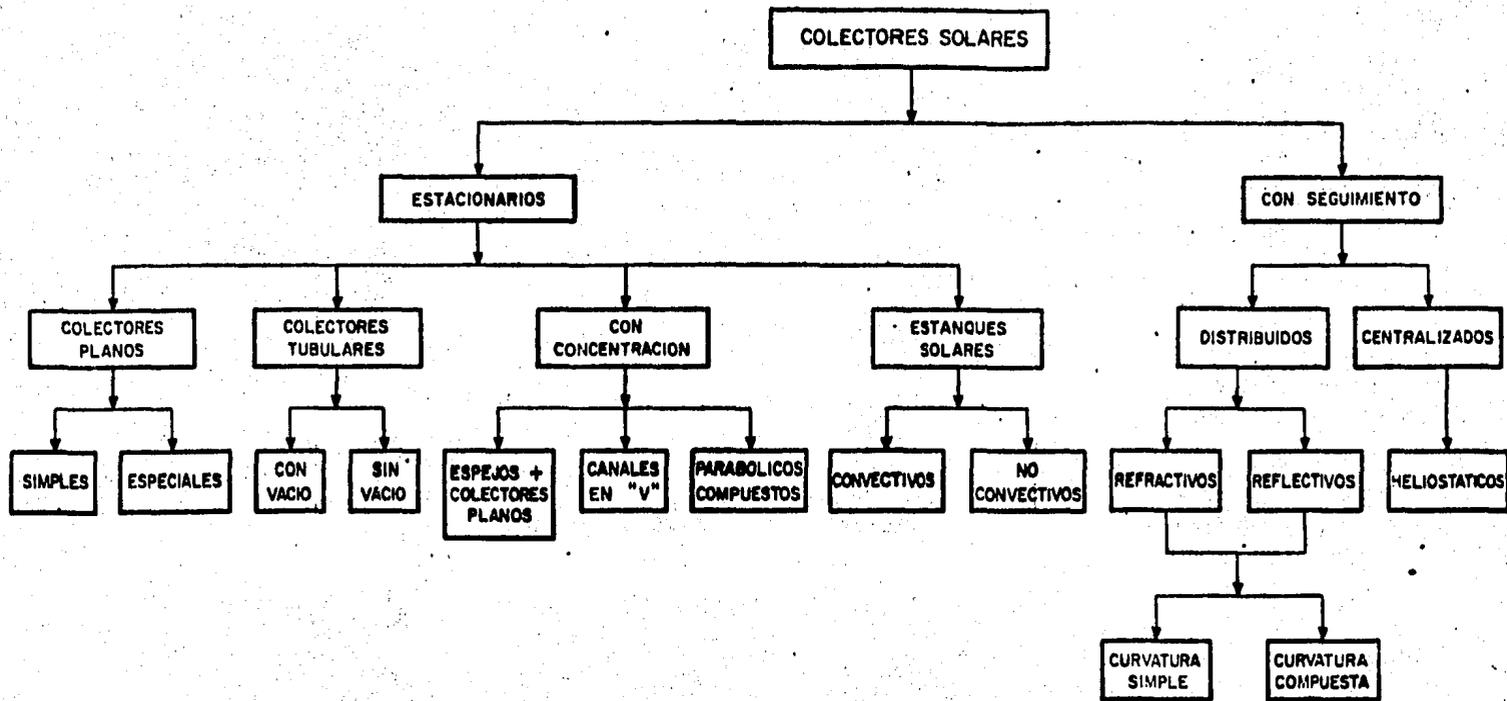


Figura 3.2 Colectores para sistemas solares de conversión termodinámica

diferentes caminos de conversión termodinámica de la energía solar. El estado actual de desarrollo tecnológico y la viabilidad económica de los sistemas de conversión termodinámica puede considerarse que son, en términos generales inversamente proporcionales a las temperaturas de operación.

#### a.1) Sistemas termodinámicos pasivos.

En estos sistemas la transferencia de calor, y en su caso la circulación del fluido caliente, ocurren de manera natural. Los sistemas térmicos pasivos han sido y son empleados principalmente para acondicionamiento del ambiente en construcciones y edificios, proporcionando calor en invierno y fresco en verano, para calentar el aire ambiente en invernaderos y, con menor frecuencia y más limitaciones para secado de materiales orgánicos y calentamiento de agua a bajas temperaturas.

Muchos de los sistemas solares pasivos para calentamiento incluyen como elemento de captación de la energía solar simplemente a ventanas de vidrio en aquellas paredes orientadas hacia el sur (en el hemisferio norte), y a las propias paredes de la construcción como el elemento de almacenamiento de energía. Los sistemas de enfriamiento utilizan la radiación infrarroja o evaporación para rechazar calor, generalmente durante la noche.

Los sistemas solares térmicos pasivos (STP) tienen

las siguientes ventajas: a) operan de manera natural y, al no requerir elementos activos móviles que se desgastan, están prácticamente exentos de mantenimiento; b) sus principios de operación son sencillos y fácilmente comprensibles; c) su costo es menor que el de los sistemas activos si las condiciones del suelo permiten la construcción de elementos masivos de almacenamiento de calor (sobretudo en climas muy fríos); d) los diseños pasivos son casi siempre más atractivos que los que emplean colectores; e) la operación de los STP no depende de la existencia y/o continuidad de alimentación de energía eléctrica.

Los materiales comunmente empleados en las construcciones capturan y almacenan calor; sin embargo, generalmente lo hacen más por propiedades intrínsecas que por diseño, con lo que en ocasiones pueden incluso incrementar los requerimientos energéticos para el acondicionamiento ambiental del interior de las edificaciones.

La mayor parte de los STP pueden considerarse en etapa de demostración o comercialización. Existe un gran número de construcciones de tipo demostrativo sobre las que se realizan mediciones de comportamiento de diferentes materiales.

Dentro de las tecnologías STP pueden distinguirse básicamente los siguientes tipos de sistemas: 1) de ganancia directa; 2) con paredes de almacenamiento

térmico; 3) con espacio solar agregado; 4) con techos de almacenamiento térmico; y 5) de malla convectiva.

En la figura 3.3 se muestran diagramas simplificados de cada uno de ellos y a continuación se describe brevemente en que consisten

#### 1) de ganancia directa

En estos sistemas la energía solar es recibida a través de una superficie vidriosa, orientada hacia el sur (en el hemisferio norte), frecuentemente colocada verticalmente. La energía captada en exceso de la requerida durante el día se almacena en los elementos constitutivos de la edificación para su aprovechamiento durante la noche. Los sistemas de ganancia directa son sumamente simples, pero la exposición continua de los materiales a la radiación solar puede deteriorarlos; se presentan variaciones moderadamente grandes en el interior de la construcción entre el día y la noche (aunque la magnitud de las mismas depende del microclima del lugar de insolación) y la luz reflejada en el vidrio puede molestar al ser vista desde el exterior.

#### 2) con pared de almacenamiento térmico (muro Trombe).

Una pared, colocada unos treinta centímetros detrás de la superficie vidriada orientada al sur, recibe la

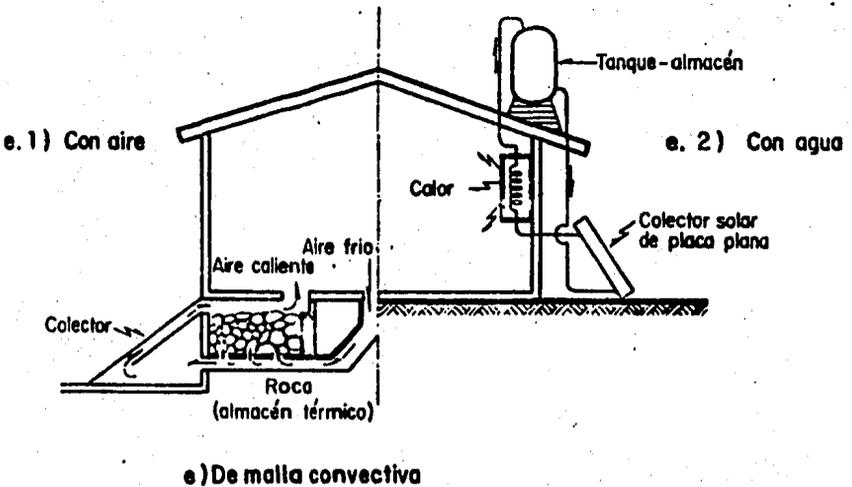
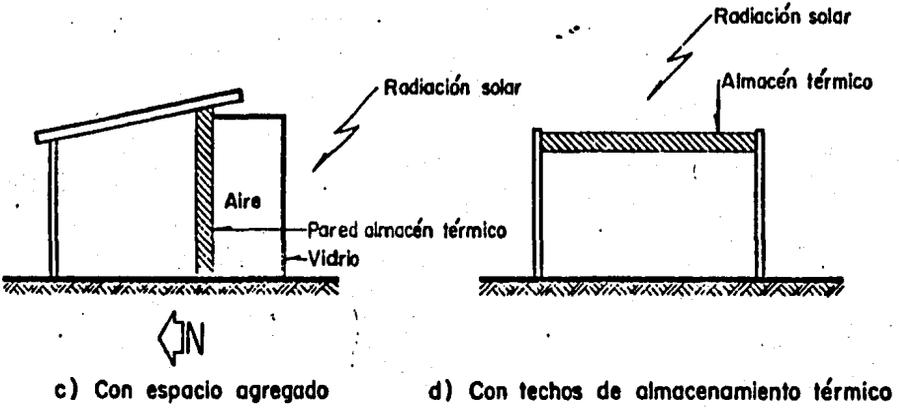
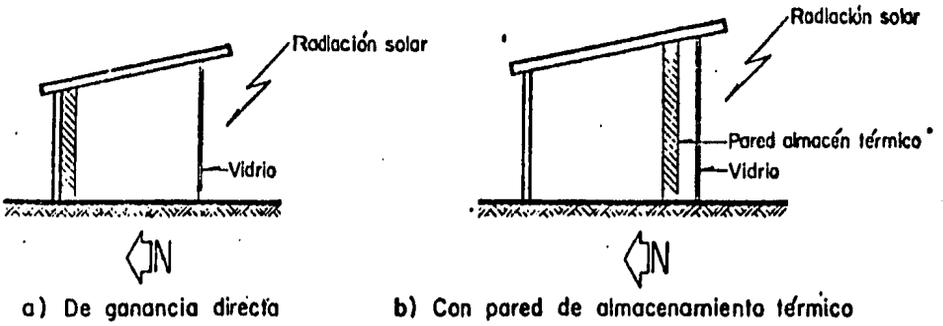


Figura 3.3 Sistemas solares térmicos pasivos

radiación solar que atraviesa el vidrio, y sirve de almacén térmico. El calor almacenado se transfiere al resto del edificio por convección y radiación. Estos sistemas reciben también el nombre de "muros de Trombe"; en éstas edificaciones las paredes son de concreto, de 0.6 metros de espesor, e incluyen circulación natural del aire entre el vidrio y la pared a través de ventilas en la parte superior e inferior de esta última (las ventilas no forman parte intrínseca del concepto de los muros de Trombe y su uso puede o no ser benéfico). En otras aplicaciones la pared-almacén térmico está formada por tubos, tanques, botellas, etc. con agua en su interior.

La principal ventaja de estos sistemas pasivos es que aíslan el ambiente interior de la construcción en condiciones extremas. Las fluctuaciones de temperatura en los cuartos detrás de la pared se reducen, los interiores quedan protegidos de la insolación directa que puede dañar los materiales y se reducen los efectos de reflejos molestos. Las combinaciones de sistemas de ganancia directa y paredes de Trombe son populares.

### 3) con espacio solar agregado.

Es un sistema que combina el sistema de ganancia directa y de pared-almacén térmico, formando una especie de invernadero (usualmente entre 3 y 5 m de ancho) entre el vidrio y la pared de la construcción orientada al sur.

Tiene las ventajas asociadas con los sistemas de pared-almacen térmico, (6).

4) con techo de almacenamiento térmico.

En estos sistemas la captación de la energía solar y el almacenamiento de calor se hacen en el techo de la construcción. El almacenamiento térmico puede estar compuesto por bolsas de plástico llenas de agua, un estanque de agua poco profundo con una cubierta superficial de plástico, u otros tipos de almacén térmico. Para operar estos sistemas eficazmente se requiere emplear algún aislante móvil, para propiciar la ganancia de calor en invierno y el rechazo de calor en verano; el almacén térmico se cubre durante las noches y se descubre durante el día en invierno, y viceversa durante el verano. Son más apropiados para sistemas combinados de calentamiento solar pasivo y de enfriamiento natural en climas relativamente secos. La utilización de estos sistemas tiene el inconveniente de que las bolsas de plástico se degradan rápidamente, y en el caso del estanque se presentan problemas de infiltración de agua al interior de la edificación, (22).

5) de malla convectiva.

Incluyen colectores solares planos que calientan agua o aire, y un almacén térmico por separado (con agua o piedras por ejemplo). La circulación del fluido se logra por efecto termosifónico. Este tipo de sistemas es poco usual, pues los que emplean colectores solares planos recurren generalmente a sistemas de circulación forzada empleando bombas.

#### a.2) Sistemas térmicos estacionarios (STE).

Los STE capturan la energía solar incidente sobre la superficie terrestre por medio de dispositivos colectores fijos, es decir, que no modifican su posición para intentar seguir el movimiento aparente del sol. Los colectores convierten la energía solar en energía calorífica y la transfieren a un fluido de trabajo (agua, aire, aceites, gases de alto peso molecular, etc.). De acuerdo al tipo de colector empleado, los STE pueden clasificarse en: 1) los de colectores planos, 2) de colectores tubulares, 3) de baja concentración, y 4) los estanques solares. De éstos, los más empleados y que tienen un mayor desarrollo tecnológico son los de colectores planos.

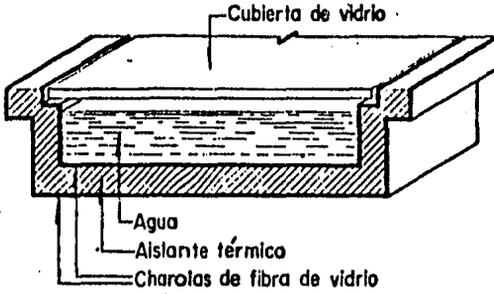
##### 1) Colectores planos

Han sido ampliamente estudiados teórica y

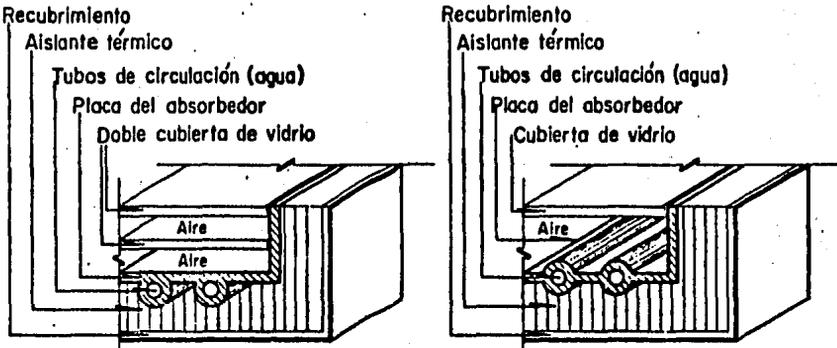
experimentalmente. Son dispositivos relativamente robustos, que operan en una posición fija, pueden captar eficientemente la energía solar y permiten alcanzar bajas temperaturas (menores a 100 grados Centígrados) en un fluido.

Un colector plano está constituido básicamente de una superficie plana o absorbedor hecha de metal, usualmente cobre, cuya superficie expuesta al sol es oscurecida para aumentar su absorción de calor; y de una red de tubos soldados al absorbedor. Este conjunto se coloca en una caja con aislante por detrás del absorbedor y una o varias capas de vidrio plano por delante del mismo.

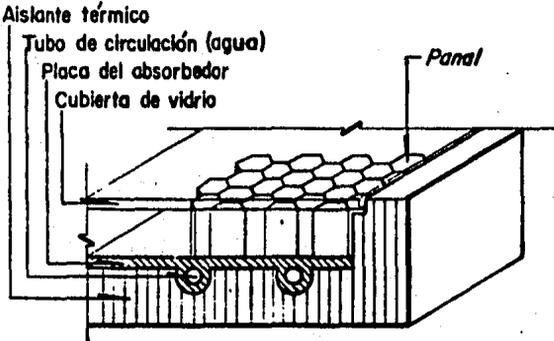
En el diseño básico mencionado anteriormente ( ver figura 3.4 ), el colector se instala generalmente inclinado para incrementar su eficiencia en la captación de energía solar. El ángulo de inclinación depende de la latitud del lugar. Se trata que la superficie de colección quede colocada de tal forma que a lo largo del año las desviaciones de su normal con respecto a la dirección sean lo más pequeñas posibles. Debido al efecto de la radiación solar interceptada, la superficie plana del absorbedor se calienta y transmite calor por conducción térmica a los tubos soldados en la misma. Por el interior de estos tubos se circula un fluido que incrementa su temperatura al entrar en contacto con ellos. La cubierta o cubiertas de vidrio reducen las pérdidas del absorbedor por convección de calor al ambiente, pero al mismo tiempo



a) Colector de bajo costo



b) Colectores planos comerciales comunes



c) Colector plano tipo Panal

Figura 3.4 Algunos diseños de colectores planos

permiten el paso de prácticamente toda la radiación solar que incide sobre el colector, (6). Las pérdidas por radiación se reducen mediante las superficies selectivas de baja emitancia, (23).

Los metales más comúnmente empleados en los absorbedores son cobre, aluminio, latón y acero. Para los colectores que emplean agua como fluido de trabajo las placas de cobre tienen ventajas desde el punto de vista de corrosión; el acero y el aluminio pueden emplearse si se utilizan soluciones no corrosivas. Los colectores que emplean aire no presentan problemas de corrosión.

Entre los recubrimientos que comúnmente son empleados para oscurecer el absorbedor están: pintura enamel negra; negro de níquel sobre níquel pulido; negro de níquel sobre hierro galvanizado; negro de níquel con dos capas de níquel electrodepositadas sobre acero; óxido de cobre sobre níquel, mediante electrodepositado de cobre y oxidación; óxido de cobre sobre aluminio; etanol C sobre cobre; y cromo negro electrodepositado sobre un recubrimiento de níquel. Este último es uno de los más utilizados.

Los aislantes comúnmente empleados son: lana mineral; corcho granulado; corcho regranulado en partículas de aproximadamente medio centímetro; paja; acerrín en polvo; espuma de poliuretano rígida; y poliestireno expandido.

## 2) Colectores tubulares

En los colectores planos difícilmente se logran temperaturas mayores a los 100 grados Centígrados, aún empleando superficies selectivas y varias cubiertas de vidrio. Para superar estas deficiencias de los colectores planos convencionales se pueden seguir los siguientes caminos: a) concentrar la radiación solar recibida en una superficie menor que la de captación disminuyendo de esta forma las pérdidas de calor al ambiente; y b) reducir las pérdidas de calor por convección al ambiente disminuyendo la presión en el espacio que rodea al absorbedor. La segunda opción presenta problemas prácticos si se trata de implantar en colectores planos. La geometría tubular es inherentemente resistente a la implosión y tiene una resistencia alta a la compresión, y es por ello que en dicha opción se recurre a colectores tubulares.

El principio de operación es muy similar al de los colectores planos, salvo que, los colectores tubulares operan a baja presión entre el absorbedor y el tubo envolvente de vidrio, con lo que se eliminan o reducen las pérdidas por conducción y convección como en el caso de los colectores planos, los colectores tubulares se instalan en una estructura de soporte con una cierta inclinación que depende de la latitud del lugar. En los colectores tubulares se elimina el aislante en la parte posterior del colector no expuesta al sol; en algunos diseños, el tubo envolvente tiene depositado por el

interior en su parte media inferior una superficie reflejante que hace las veces de concentrador.

Algunos colectores tubulares son denominados también "caloriductos", estos consisten en un tubo sellado que contiene una pequeña cantidad de líquido en equilibrio con su vapor saturado. Al aplicarse calor en un extremo del tubo, el líquido se evapora y fluye hacia el lado frío; el exceso de vapor se condensa en el extremo frío del caloriducto cediendo calor, regresando el condensado al extremo caliente por fuerzas capilares o por gravedad, (figura 3.5).

#### 3.5 Colectores con concentración

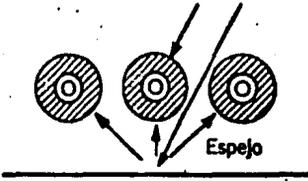
Se tratan a continuación colectores con concentración estacionaria, es decir que no siguen el movimiento diario aparente del sol. El principio de operación de estos colectores es el mismo que el de los colectores planos o tubulares; esto es, se expone al sol una superficie que absorbe la radiación recibida y aumenta con ello su temperatura; el calor así ganado es transferido a un fluido que se pone en contacto con la superficie absorbidora. En el caso de los colectores con concentración, para aumentar la cantidad de energía recibida sin aumentar proporcionalmente el área de



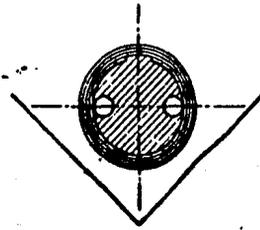
a) KTA



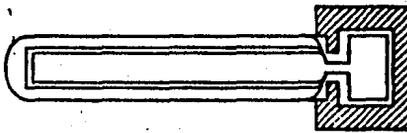
b) Phillips



c) Owens-Illinois



d) General Electric



e) Caloriducto

Figura 3.5 Diseño de diferentes colectores tubulares

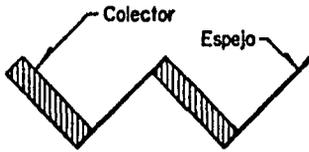
absorbedor expuesta al sol y por tanto las pérdidas, se emplean espejos que reflejan la radiación que incide sobre ellos en un área de absorbedor más pequeña, (figura 3.6).

#### 4) Estanques solares

Una masa estática de agua (estanque, lago, mar) es potencialmente un colector solar horizontal que puede obtener una gran área de captación. La mayoría de los sistemas térmicos solares de baja temperatura constan de una unidad que capta la energía solar de una unidad y otra, en la que se almacena la energía capturada. En los estanques o lagos solares el colector y el almacén térmico están fundidos en uno, ya que el mismo cuerpo de agua realiza las dos funciones. Pueden ser esencialmente de dos tipos: a) los no convectivos, que reducen las pérdidas naturales de calor al evitar la convección dentro de la masa; y b) los convectivos, usualmente muy poco profundos (menores de 50 cm.) que reducen las pérdidas de calor cubriendo la superficie del estanque con algún material transparente.

#### a.3) Sistemas térmicos con seguimiento.

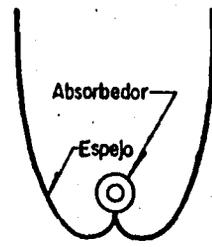
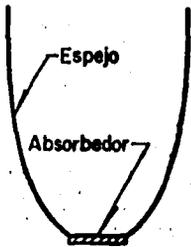
Cuando se desean alcanzar temperaturas medias o altas



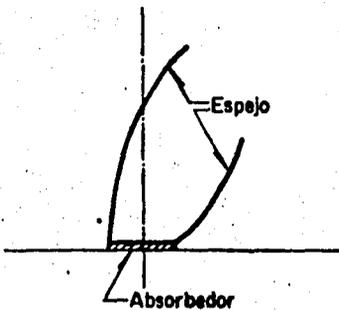
a) Colectores planos y espejos



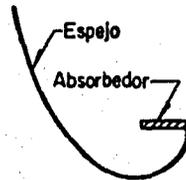
b) Espejos en V



c) Colectores parabólicos compuestos



d) Parabólico compuesto asimétrico



e) Tipo *Concha marina*

Figura 3.6 Colectores concentradores estáticos más comunes

(mayores a 250 grados centígrados) mediante el aprovechamiento de la energía solar se hace necesario, dada la baja densidad energética de la radiación solar, contar con colectores con una mayor relación de concentración que la obtenible en los colectores solares estacionarios con concentración. Los colectores de alta razón de concentración deben reflejar los rayos solares en áreas muy pequeñas comparadas con las de captación.

Para lograr esto los colectores deben ser capaces de seguir el movimiento diario aparente del sol, ya sea en una o en dos direcciones. Suelen distinguirse dos grandes grupos: a) los llamados distribuidos, que pueden ser de enfoque lineal o puntual; y b) los de torre central, que emplean espejos planos llamados heliostatos, para concentrar la radiación solar en algún punto elevado sobre ellos. En los sistemas distribuidos cada módulo de espejos o colector tiene su propio absorbedor; en los de torre central todos los espejos se enfocan hacia un absorbedor común. Los sistemas con concentración, aprovechan solo la componente directa de la radiación solar.

#### b) Sistemas fotovoltaicos

Las celdas solares (fotovoltaicas) son dispositivos que absorben energía de los fotones presentes en la luz que incide sobre ellas y la convierten en energía eléctrica.

El efecto fotovoltaico ocurre en dispositivos en que: 1) En uno de los materiales que los componen se generan portadores móviles de carga eléctrica mediante la absorción de la energía de los fotones presentes en la luz y 2) Existe además una barrera de potencial que permite separar a los portadores de carga de la región en que se generan.

Los materiales semiconductores, materiales en que la brecha de energía entre la banda de valencia y la de conducción es suficientemente pequeña como para que electrones en estados de energía cercanos a la parte superior de la banda de valencia alcancen la de conducción al excitarse térmicamente, satisfacen la primera condición. La conducción de energía eléctrica en los semiconductores ocurre por los electrones que saltan a la banda de conducción, y por los "huecos" dejados por ellos en la banda de valencia al pasar a la de conducción. Cuando el número de electrones y huecos que se forman son iguales, el semiconductor se denomina intrínseco. Agregando impurezas a un semiconductor intrínseco se puede lograr que el número de electrones disponibles para la conducción sea mayor que el de huecos, en cuyo caso se habla de un semiconductor de tipo "n", o que los huecos sean mayoritarios, recibiendo entonces el semiconductor la denominación de tipo "p".

Al poner en contacto semiconductores de tipo "p" y tipo

"n" se tiene en la unión la barrera de potencial a que se refiere la condición 2) . Los semiconductores no son los únicos materiales en que puede ocurrir el efecto fotovoltaico, ni éste está restringido a sólidos. Sin embargo, todas las celdas solares fotovoltaicas son actualmente fabricadas a partir de semiconductores.

En la actualidad pueden distinguirse los siguientes tipos de celdas fotovoltaicas según los materiales empleados en las capas que las forman, (entre paréntesis se anotan valores de las eficiencias obtenidas en laboratorio según "Air Mass 1"):

1) Homounión. Un mismo material base con diferentes impurezas para obtener los semiconductores tipo "n" y "p". Los semiconductores más comunes y sus eficiencias son: silicio monocristalino (18%), silicio policristalino (10%), silicio amorfo (7%), arsenuro de galio monocristalino (22%), y fosfuro de indio (6%).

2) Heterounión. El semiconductor base tipo "n" es diferente del tipo "p". Las celdas más comunes son:  $Cu_2S/S$  (5%),  $InP/CdS$  (14%),  $CdTe/CdS$  (8%), y  $Cu_xS/CdS$  (10%).

3) Schottky. La unión está formada por un semiconductor y un metal. Tal es el caso de las celdas de  $A/W_2Se$  y  $Al/Si$ , con eficiencias del 5 y 13 %

respectivamente.

4) MIS (Metal Insulation Semiconductor). Unión tipo Schottky con una capa aislante de 10 a 15 micrones entre metal y semiconductor. En silicio se han obtenido eficiencias del 12% y en arsenuro de galio del 15%.

5) SIS (Semiconductor Insulator Semiconductor). Unión entre dos semiconductores con una capa aislante de 10 a 16 micras entre ellos. Por ejemplo ITO/silicio (12%) y óxido de estaño/silicio (12%).

6) Electroquímicos. Un semiconductor (arsenuro de galio monocristalino) con unión líquida; el semiconductor está inmerso, por ejemplo, en una solución líquida de compuesto de selenio.

Las celdas solares fotovoltaicas son modulares, no tienen partes móviles, operan a la temperatura ambiente (salvo en sistemas de concentración), tienen una vida útil larga, responden tanto a la radiación directa como a la difusa y prácticamente no requieren de mantenimiento.

c) Sistemas fotoquímicos.

Muchos materiales absorben cantidades importantes de

luz en alguna región del espectro solar. Las moléculas que absorben la radiación solar incrementan su energía instantánea y como producto de ello pueden ocurrir cambios químicos. Si las reacciones que ocurren son endotérmicas, los productos de la reacción tendrán mayor energía química que los reactantes y se habrá convertido la energía solar en energía química, misma que podrá ser utilizada para realizar trabajo posteriormente.

Cuando una molécula de un material absorbe luz infrarroja o de mayor longitud de onda, queda en un estado de excitación de tipo vibratorio o rotatorio y la energía que ha ganado dicha molécula se redistribuye al chocar contra otras moléculas, aumentando así la temperatura del material. Si absorbe luz visible o ultravioleta puede quedar en un estado de excitación electrónica que casi instantáneamente puede hacer que la molécula participe en una reacción primaria (disociación molecular, rearrreglo químico o reacción química). La probabilidad de ocurrencia de cada tipo de reacción primaria depende de la energía de luz absorbida y de la naturaleza de los estados electrónicos superiores del material que la absorbe.

Para que la reacción fotoquímica tenga significado práctico debe cumplirse que: 1) el cambio químico resulte en un incremento grande de energía libre; 2) el espectro de absorción de luz del material este comprendido en el de la luz visible o ultravioleta; 3) la reacción química sea

cíclica, es decir, que los productos puedan recombinarse para formar los reactantes originales; 4) la reacción de recombinación sea muy lenta bajo condiciones ambientales normales; 5) la reacción anterior se realice sin dificultad en condiciones controladas para liberar energía térmica o eléctrica; 6) los reactantes sean abundantes y baratos, y el sistema donde ocurra la reacción esté formado por componentes simples y económicos; y 7) los reactantes sean de fácil almacenamiento y transporte y no sean tóxicos.

Las principales tecnologías fotoquímicas para el aprovechamiento de la energía solar son:

1) Foelectrosíntesis. La luz es absorbida por un semiconductor en contacto con un electrolito líquido, produciéndose energía química.

2) Celdas fotovoltaicas electroquímicas. Similar a la tecnología anterior, pero produciéndose energía eléctrica como resultado.

3) Celdas fotogalvánicas. La luz excita moléculas teñidas (fotoactivas), en una solución, lo cual induce un proceso farádico en un electrodo. Al excitarse las moléculas teñidas se produce una reacción redox entre ellas y un segundo reactante. La especie oxidada se difunde

hacia el electrodo iluminado (u obscuro) donde es reducida a su estado original. La especie reducida se difunde hacia el electrodo obscuro (o iluminado) y es oxidada a su estado original. El efecto neto es un flujo de carga de un electrodo a otro para satisfacer las reacciones redox, pudiéndose extraer energía eléctrica de la celda.

4) Sistemas microheterogéneos redox. Consisten en dispersiones coloidales de partículas micelulares o semiconductoras que permiten una separación de carga y estabilización a través del potencial creado a la interfaz partículas-líquido. La luz es absorbida por moléculas teñidas íntimamente asociadas a la superficie de las partículas. En algunos sistemas se introducen catalizadores para ayudar a las reacciones de reducción y oxidación.

5) Biofotólisis. Se emplean cloroplastos sintéticos consistentes en pigmentos moleculares asociados con membranas artificiales. La excitación de los pigmentos da como resultado una separación de carga a través de la membrana, ocurriendo las reacciones de oxidación y reducción en lados opuestos de la misma.

La producción de hidrógeno tiene gran interés por ser considerado éste un combustible ideal.

#### d) Sistemas termiónicos.

Estos sistemas convierten la energía calorífica directamente en electricidad, aprovechando la emisión de electrones de una superficie o cátodo caliente. Los electrones viajan a través del vacío o de un espacio gaseoso hacia un ánodo frío o colector. Al conectar una carga eléctrica entre el cátodo y el ánodo se puede extraer potencia eléctrica útil, (6).

#### 2.- La Acumulación.

El almacenamiento de la energía se llevará a cabo dependiendo de la conversión de la energía primaria. Si fuerón células fotovoltaicas las encargadas de transformar la energía eléctrica, su almacenamiento se efectuará en acumuladores; si la captación se efectuó por colectores solares, la acumulación térmica se hará mediante depósitos-acumuladores.

La acumulación de la energía térmica se puede realizar teniendo en cuenta el calor latente de la sustancia o su calor sensible. En el primer caso, puede ser aprovechada la propiedad de algunas sustancias (sales inorgánicas) de cristalizar mediante proceso exotérmico,

el calor absorbido por las sales al disolverse sería suministrado por los colectores solares, y sería transferido al acumulador en el proceso de cristalización de las mismas. Para el caso de la acumulación por calor sensible se utilizan sustancias de gran capacidad calorífica como el agua y la grava.

Los depósitos acumuladores empleados en el almacenamiento de calor pueden ser manufacturados o realizados "in situ".

Los fabricados comercialmente son exclusivamente de acumulación de calor mediante agua, figuras 3.7 y 3.8, se esquematizan los sistemas más usuales, a saber, el de serpentín y el baño envolvente.

Los acumuladores contruidos "in situ" (figuras 3.9 y 3.10) utilizan como elementos de almacenamiento el agua y la grava.

El hecho de construirlos tiene la ventaja de adaptarse a las necesidades de ubicación. No plantea problemas de corrosión. Su tamaño puede adaptarse a las necesidades del usuario, sin tener que ajustarse a los módulos ofertados comercialmente, (4).

### 3.- Usos.

En el cuadro 3.2 se presenta un resumen de los usos

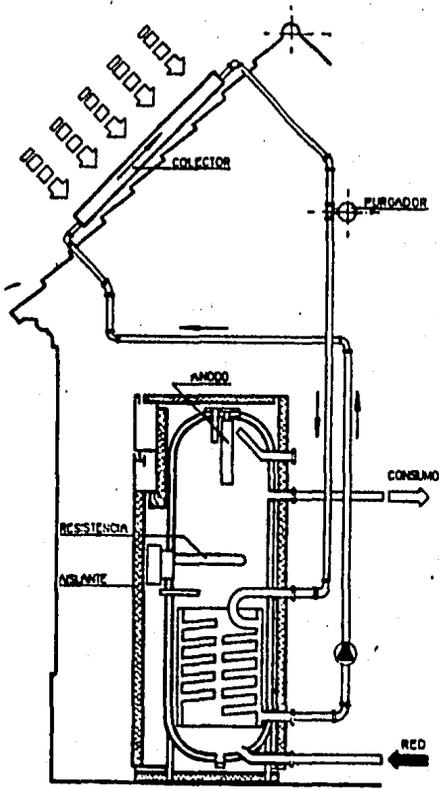


Figura 3.7 ACUMULADOR DE SERPENTIN

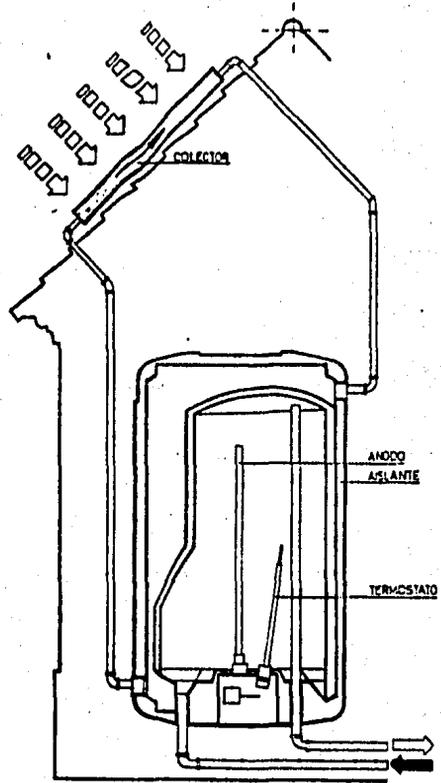


Figura 3.8 ACUMULADOR DE BAÑO ENVOLVENTE

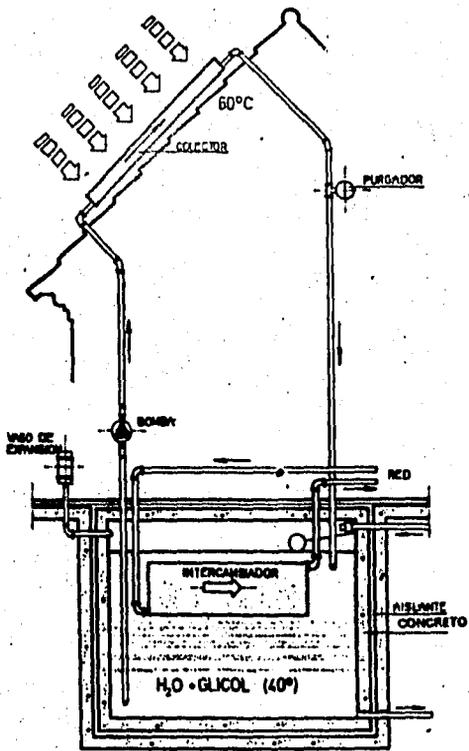


Figura 3.9 ACUMULADOR DE AGUA (IN SITU)

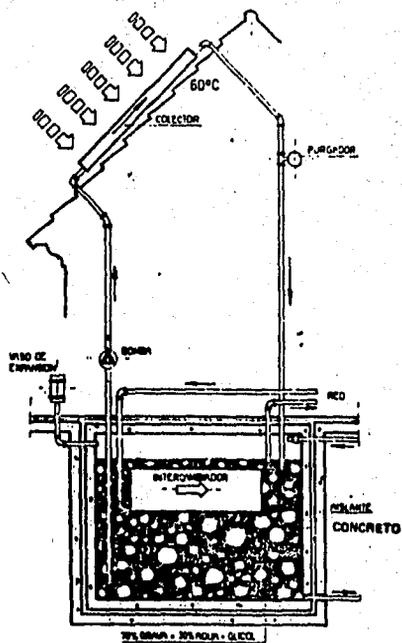


Figura 3.10 ACUMULADOR DE GRAVA (IN SITU)

Cuadro 3.2 SOLAR ENERGY APPLICABILITY MATRIX  
(Middleton Associates, 1979)

Tecnología Solar	Uso de la Energía													
	Bombeo de agua	Alumbrado	Enfriamiento	Comunicaciones	Desalación de agua	Energía Mecánica en Polea	Cortar	Calentamiento			Molino	Secado	Transporte	Fertilizantes
								Cocinado	Espacio del Hábitat	Agua Doméstica				
Celdas Solares	*	*	*	**	-	*	-	-	-	-	*	-	-	-
Colectores Planos	*	-	*	-	**	-	-	*	**	**	-	**	-	-
Colectores con concentración	*	*	*	*	*	-	*	-	-	-	-	-	-	-
Ciclo Stirling	*	*	*	*	-	*	*	-	-	-	*	-	-	-
Ciclo Rankine	*	*	*	-	*	*	*	-	-	-	*	-	-	-
Captadores de viento	**	-	-	-	-	*	*	-	-	-	**	-	-	-
Generador eléctrico de viento	**	**	**	**	-	*	*	-	-	-	-	-	-	-
Máquinas hidráulicas	**	-	-	-	-	**	**	-	-	-	**	-	-	-
Hidroeléctricas	**	**	**	*	-	**	**	-	-	-	**	-	-	-
Bioconversión de madera	-	*	-	-	-	-	**	**	**	-	**	-	-	-
Dióxis	*	**	*	-	**	-	**	-	*	-	*	*	*	**

Símbolos: \*\*= Aplicable; \* = Potencialmente aplicable; - = No aplicable.

actuales y potenciales de la energía solar, de acuerdo a sus requerimientos tecno-económicos en función del sector y de la tecnología a emplear, (13).

## Capítulo IV. Aplicaciones de la energía solar a la edificación.

1.- Manejo del clima para la modulación de las condiciones de confort dentro de las edificaciones.

Las decisiones de diseño concernientes a la forma de edificación y orientación, localización y sombras de espacios interiores, ventanaje, estructura, construcción y materiales y acabados, tendrán gran influencia en el funcionamiento y cualidades térmicas de la edificación y el confort de sus ocupantes. Tradicionalmente los sistemas mecánico y eléctrico han sido diseñados en respuesta a la arquitectura, después de la concepción de la edificación. Sin embargo, en la edificación pasiva, se puede decir que generalmente la energía fluye naturalmente; la edificación es el sistema.

El edificio, como un sistema, interactúa con los ciclos del medio ambiente horario, diario y estacional para modular las condiciones interiores, (24).

Un diseño de una edificación pasiva procurará, dentro de lo posible restricciones económicas, para maximizar los beneficios de los recursos del medio ambiente y para minimizar la dependencia de equipo mecánico y combustibles fósiles.

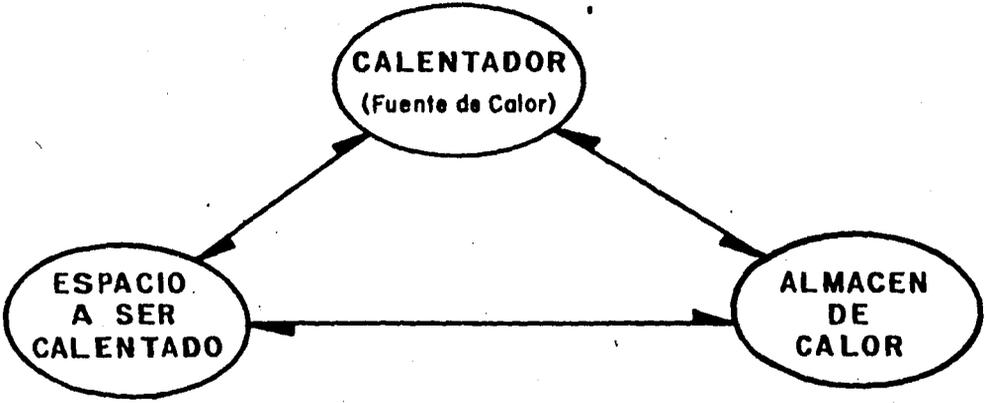
Los sistemas solares de calentamiento usan elementos de

la edificación para coleccionar, almacenar y distribuir energía. En el enfriamiento pasivo también se usan elementos de la edificación para guardar y distribuir energía y cuando las condiciones prevalecientes sean favorables, para descargar calor para las partes frías del ambiente (cielo, atmósfera y suelo o tierra). En todos los casos, la transferencia de energía para y desde la edificación y dentro de la misma, se da principalmente en un proceso natural, por ejemplo, conducción, convección y radiación, con la mínima dependencia en equipo mecánico como son ventiladores, bombas y compresores. El equipo mecánico puede ser utilizado efectivamente para incrementar los flujos naturales de energía cuando el costo del capital y la energía de operación son justificados por el mejoramiento en el funcionamiento del sistema.

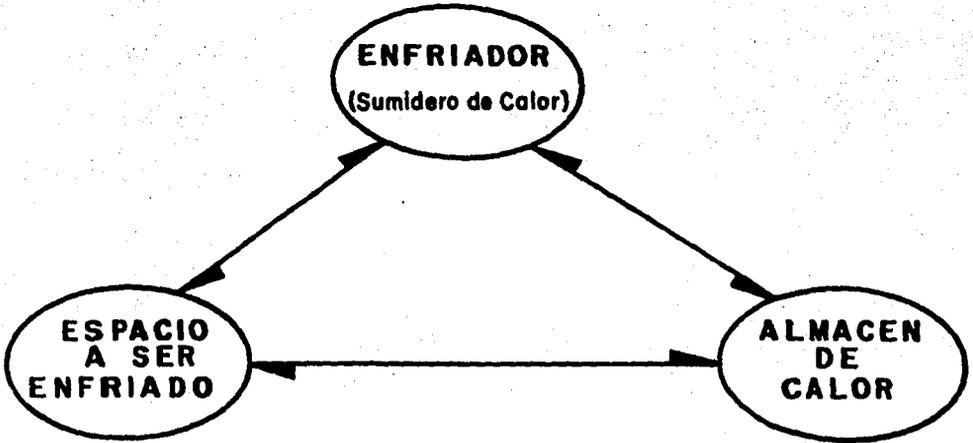
En este capítulo daremos una clasificación de los sistemas pasivos comunes e híbridos de calentamiento y enfriamiento, para lo cual daremos a continuación algunas definiciones generales:

Un sistema pasivo de calentamiento del espacio contiene los siguientes elementos (figura 4.1):

- Un espacio para ser calentado.
- Un colector donde la radiación solar es admitida dentro del sistema y convertida a calor por un absorbedor (este puede ser solo la envoltura de la edificación). Por lo tanto es la fuente de calor.



**Figura 4.1 Sistema de Calentamiento**



**Figura 4.2 Sistema de Enfriamiento**

- Un almacén de calor, que es la capacidad térmica de la masa de la edificación.

Los posibles intercambios de energía existen entre:

- . La fuente de calor y el almacén.
- . La fuente de calor y el espacio.
- . El almacén y el espacio.

Un sistema de enfriamiento del espacio contiene los siguientes elementos (figura 4.2):

- Un espacio para ser enfriado.
- Un enfriador o sumidero de calor (cielo, atmósfera, o suelo), para el cual el calor es descargado.

- Un almacén térmico, que es la capacidad térmica normal de la masa de la edificación.

Los posibles intercambios de energía existen entre:

- . El enfriador y el almacén.
- . El enfriador y el espacio.
- . El almacén y el espacio.

En un sistema dado de calentamiento o enfriamiento, algunos de los intercambios no pueden existir, o cuando menos ellos pueden ser insignificantes.

Los intercambios de energía pueden caer dentro de dos categorías:

- Forzado (utilizando ventiladores, bombas y compresores).

-Natural

Si todos los intercambios significantes vinculan los tres elementos del sistema de calentamiento o enfriamiento involucrando un flujo forzado, el sistema es clasificado como **ACTIVO**.

Si todos los intercambios significantes vinculan los tres elementos de calentamiento o enfriamiento involucrando un flujo natural puro, el sistema es clasificado como **PASIVO**.

Si alguno de los intercambios significantes vinculan los tres elementos del sistema de calentamiento o enfriamiento, involucrando predominantemente flujo natural, pero el sistema incorpora también dispositivos mecánicos para mover energía, entonces el sistema es clasificado como **HIBRIDO**.

#### a) Sistemas pasivos de calentamiento

Aquí hay dos factores particularmente importantes que deben ser considerados para cualquier esquema de caracterización de un sistema solar de calentamiento:

i. Las características de la apertura de colección son:

- . Orientación con respecto al sur y la vertical.
- . La localización relativa para el resto de la estructura de la edificación.

ii. El método en que se está entregando la energía

para el espacio acondicionado:

- . Mecanismo(s) de energía.
- . Graduación esencial del control térmico, (25).

a.1) Características de la apertura de colección.

El conocimiento de la trayectoria del sol en su movimiento aparente por el cielo es necesario con el fin de realizar cálculos de la ganancia de calor solar, para determinar la orientación adecuada de dispositivos solares, la localización de dispositivos para sombrear, etc.

Se puede decir que el movimiento aparente del sol es aquel con el que estamos más familiarizados y en el que se mueve diariamente describiendo un arco a través del cielo alcanzando su punto más alto al medio día. Además, a medida que el invierno se convierte en primavera y posteriormente en verano, en el hemisferio norte los puntos del alba y el ocaso se mueven gradualmente sobre el horizonte hacia el norte. En el hemisferio sur sucede lo contrario. Vease figura 4.3.

Para la mayoría de las aplicaciones en energía solar se necesitan predicciones razonablemente exactas de dónde se encontrará el sol en el cielo a cualquier hora del día y del año. Las relaciones geométricas entre un plano con cualquier orientación relativa a la tierra (ya sea que esté fijo o en movimiento relativo a la tierra) y el sol,

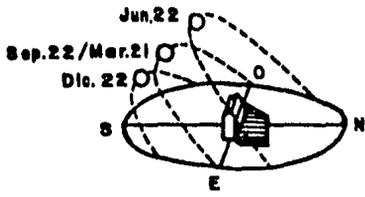


Figura 4.3

Trayectoria aparente del sol.

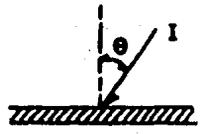
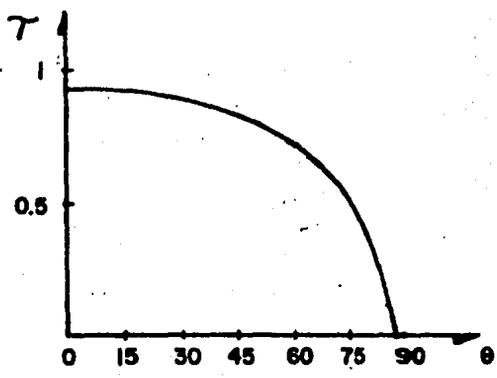


Figura 4.4

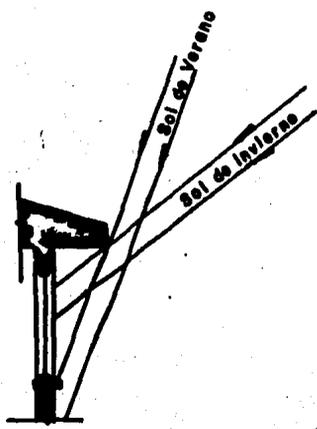


Figura 4.5

se pueden describir en función de varios ángulos.

Información más detallada al respecto puede consultarse en la referencia(21).

De acuerdo a lo anterior, se puede aprovechar el sol de invierno colocando el vidriado en las fachadas sur, con una cierta inclinación para recibir, de ser posible, perpendicularmente los rayos solares y así tener una máxima ganancia de calor, (figura 4.4).

Por otro lado, el vidriado de las fachadas sur puede no estar expuesto a la radiación directa del sol de verano durante una porción substancial del día, y durante aquellas horas en que ocurre la exposición, el ángulo de incidencia no es favorable para penetrar. Además, modestos aleros pueden eliminar completamente toda exposición a la radiación directa del sol de verano, (figura 4.5). El movimiento del sol es el mejor control de las condiciones térmicas del ambiente dentro de la edificación.

Con respecto al vidriado horizontal (tragaluces) deben usarse algunos métodos especiales para regular el flujo de energía a través de la apertura (por ejemplo aislantes móviles, que en invierno permitan el paso de la radiación y en verano la obstruyan).

Asimismo es importante la localización de las aperturas relativas para el resto de la estructura de la edificación. En los sistemas pasivos comunes de calentamiento, las tres posibles localizaciones son la pared sur, el techo y en alguna parte alejada de la envoltura

propia de la edificación, (25).

Los sistemas de calentamiento de la pared sur tienen las ventajas de ser simples y económicos. Los sistemas de calentamiento del techo trabajan bien donde las restricciones del terreno limiten la exposición de la pared sur o la orientación adecuada de la edificación este restringida. Ellos también tienen la ventaja de estar dando a todas las zonas por igual. Los sistemas de calentamiento remotos pueden ser diseñados para tener simples controles que limiten las ganancias o pérdidas no requeridas de la edificación. Ellos también tienen la ventaja de proporcionar un área de colección adicional para complementar la energía colectada a través de la propia envoltura de la edificación.

Las combinaciones ventajosas de la orientación y localización de las aperturas para un sistema solar de calentamiento son:

- Una apertura sur.
- Una apertura en el techo sombreada.
- Una apertura en el techo.
- Una apertura remota.

a.ii) Método de la energía entregada.

La manera en que la energía es entregada para el acondicionamiento del espacio tiene un profundo impacto en el grado de uniformidad térmica que se requiera. A

continuación se dan tres categorías amplias de sistemas solares de calentamiento basados en energía entregada para el espacio:

-Para calentamiento directo, la luz del sol es admitida directamente para el espacio, donde ésta es convertida en calor por absorción en las superficies interiores y contenido del espacio. La temperatura del aire en el espacio "fluctua" con las superficies absorbentes y/o el almacenamiento.

-Para el calentamiento indirecto, la luz del sol es convertida en calor por absorción en una superficie externa al espacio. El contenido del espacio no es expuesto a la luz directa del sol. La temperatura del aire en el espacio "fluctua" con el absorbedor y/o el almacenamiento.

-Por calentamiento aislado, la luz del sol es convertida a calor por absorción en una superficie externa al espacio, El contenido del espacio no esta expuesto a la luz directa del sol. La temperatura del aire en el espacio puede ser regulada independientemente del absorbedor y almacenamiento.

Varias combinaciones de localización de las aperturas y mecanismos para transferir energía para el espacio ocupado se muestran esquemáticamente en la figura 4.6. Estas combinaciones de ningún modo agotan la lista de posibilidades.

En algunas ocasiones la combinación de los tres sistemas son de considerable importancia.

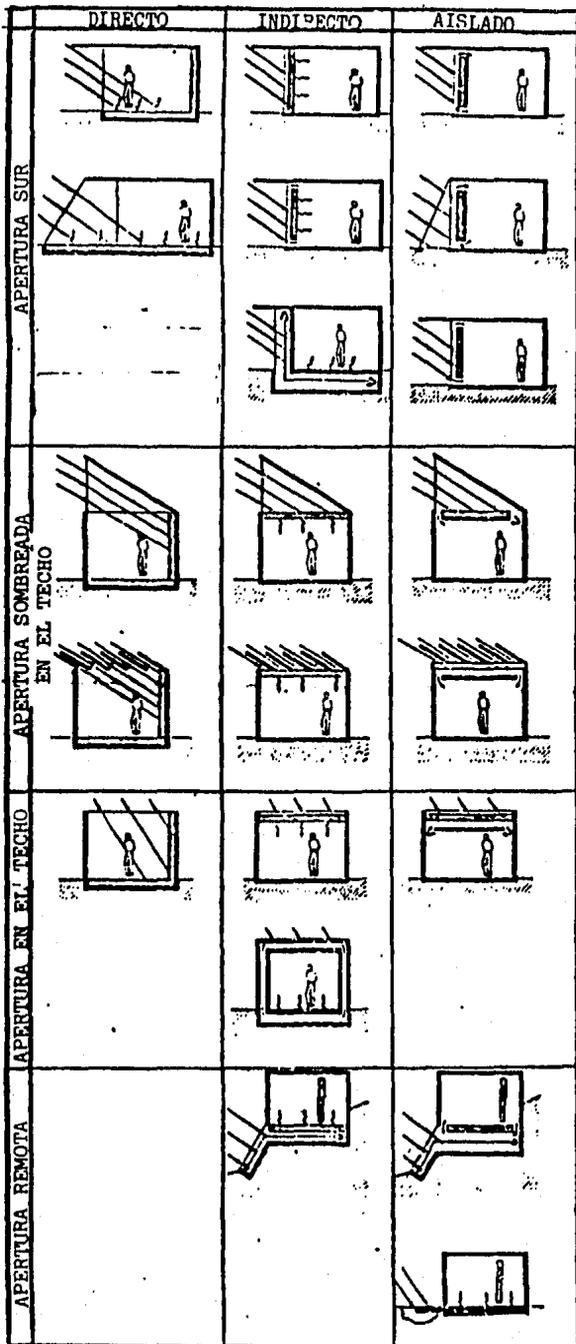


Figura 4.6 Sistemas solares pasivos de calentamiento.

Se muestra una clasificación de multi-zona; esquemas de una sola planta con calentamiento solar aplicado para cada zona. Algunos de los ejemplos de dos zonas más interesantes están ilustrados en la figura 4.7. Estos sistemas tienen la cualidad que cada zona puede ser diseñada individualmente para encontrar los requerimientos particulares térmicos y de iluminación dictados por la función deseada del espacio.

La clasificación se dificulta grandemente cuando se trata de edificaciones de varios pisos, particularmente por la alta ocupación en aplicaciones comerciales o situaciones donde los procesos industriales requieran de rangos de alta ventilación. Por lo tanto los esquemas híbridos involucrando asistencia mecánica de transferencia de calor serían los más apropiados.

#### b) Sistemas pasivos de enfriamiento.

El enfriamiento involucra la descarga de energía por un acoplamiento selectivo del sistema para las partes más frías del medio ambiente. Si las condiciones del medio ambiente son favorables, este flujo de energía podría ocurrir por medios naturales. Los posibles enfriadores o sumideros de calor del medio ambiente son el cielo, la atmósfera y el suelo.

En el enfriamiento al cielo, la radiación del sistema pasa a través de la atmósfera y es disipada al espacio

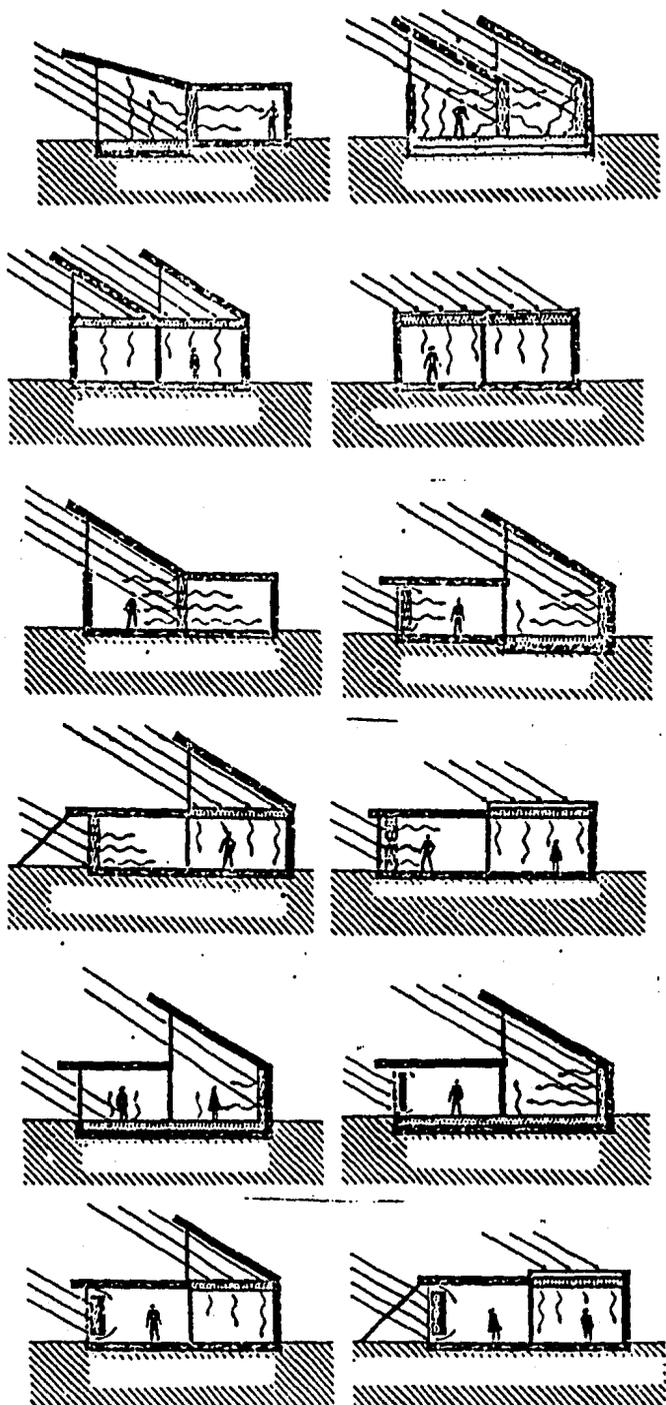


Figura 4.7 Sistemas solares pasivos en multi-zona.

exterior.

El enfriamiento radiativo al cielo trabaja bien en condiciones ambientales con cielos claros, y tiene el potencial para enfriar el sistema debajo de la temperatura del aire ambiente. El límite primario para este tipo de enfriamiento es la ganancia de calor convectivo y radiativo proveniente de la atmósfera circunvecina.

La energía del sistema también puede ser descargada a la atmósfera durante aquellos momentos cuando las condiciones del aire ambiente son favorables para tal intercambio. El calor puede ser disipado por una elevación de la energía de calor sensible del aire circunvecino (por ejemplo, el aire frío de la noche) o por elevación de la energía de calor latente (por ejemplo el enfriamiento evaporativo). En cada caso, la transferencia de energía puede ser mejorada grandemente por el movimiento de aire incrementado. El manejo de la energía para este movimiento puede venir del viento, ventiladores, o mecanismos de manejo convectivo especiales. En climas secos, se tiene potencialmente el enfriamiento evaporativo, lo mismo que el enfriamiento por radiación al cielo, para reducir la temperatura del sistema por debajo de la temperatura del aire ambiente.

Cuando las temperaturas del suelo son considerablemente más bajas que la temperatura del aire del medio ambiente, puede ser utilizado para remover una fracción de la carga de enfriamiento normal. Sin embargo, en general, en México

no se dá este fenómeno y no se puede aprovechar este sumidero de calor.

La tabla 4.1 ilustra los sumideros o enfriadores del medio ambiente, junto con los mecanismos primarios involucrados en la transferencia de energía.

Análogamente a los sistemas de calentamiento, a continuación se dan los procesos de enfriamiento directo, indirecto y aislado:

- Enfriamiento directo, ocurre cuando las superficies y contenido del espacio son expuestas directamente a el (los) medio(s) de enfriamiento del ambiente (sumideros).

- Enfriamiento indirecto, ocurre cuando el lugar es enfriado por radiación no controlada al almacén (o alguna superficie de intercambio) que está frío en ese momento por exposición a él (los) sumidero(s) de energía del ambiente.

- Enfriamiento aislado, ocurre cuando el espacio es enfriado por un fluido controlado o transferencia radiativa al almacén (o alguna superficie de intercambio) que está fría en ese momento por exposición a él (los) sumidero(s) de energía del ambiente.

Una muestra representativa de las combinaciones de los sumideros de energía térmicos del medio ambiente y mecanismos para transferir energía del espacio ocupado, se muestran en la figura 4.8.

Las configuraciones mostradas incluyen los sistemas solares de enfriamiento generalmente más comunes y una

SUMIDERO (Enfriador)	MECANISMO PRIMARIO DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA
CIELO	RADIACION
ATMOSFERA	CONVECCION†
SUELO	CONDUCCION

† Incluye evaporación

Tabla 4.1

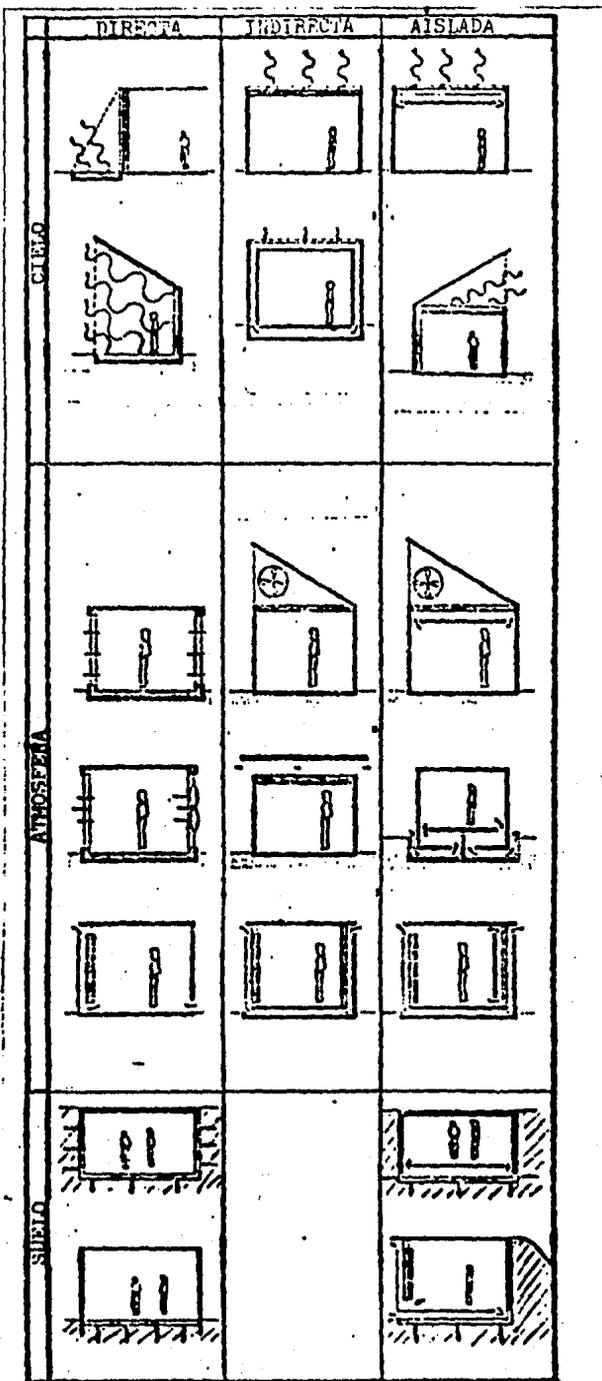


Figura 4.8 Sistemas pasivos para el enfriamiento.

muestra representativa de los menos comunes que pueden tener igual potencial. Estas combinaciones de ningún modo agotan la lista de posibilidades. Se debe prestar interés en los sistemas cuyos elementos puedan servir tanto al calentamiento como al enfriamiento. Por ejemplo, un sistema de enfriamiento de techo de almacenamiento utiliza los mismos elementos que un sistema de calentamiento de techo de almacenamiento, excepto que el aire del espacio, puede ser necesario para reducir pérdidas de invierno, y debe ser eliminado en el enfriamiento de verano.(25)

En lo que respecta al diseño de un sistema de ventanaje para un enfriamiento por ventilación se pueden identificar cuatro pasos. Primero, es importante tener una clara imagen del rango direccional del viento en la envolvente del lugar en todo el ciclo anual y diario. Segundo, es necesario hacer una determinación de las necesidades de enfriamiento ventilativo (diurno y estacional) para el confort térmico. Tercero, es necesario evaluar el resguardo de las estructuras o topografías vecinas. Y cuarto, es vital escoger un sistema de ventanaje cuyas características funcionales correspondan tanto al viento como al confort térmico requerido.

Generalmente hablando para la mayoría de las configuraciones de ventanas, la orientación de aberturas de entrada a 90 grados al viento, proporcionan el más alto promedio de relación de velocidad interior, con velocidades del flujo de aire dispersándose rápidamente

con los cambios del viento externo para ambos lados de los 90 grados. Se ha encontrado que ciertas combinaciones de las características de las aberturas de entrada, especialmente la forma, mientras proporcionan substancialmente resultados similares con viento a 90 grados, son también capaces de proporcionar igual o mejor enfriamiento ventilativo en ventanas oblicuas (arriba de 45 grados) que éstas en ventanas normales.

Esto es un descubrimiento de particular importancia puesto que la dirección del viento rara vez es constante. Si los sistemas de ventanas son para tomar una máxima ventaja de la potencia de ventilación del viento, ellas deberían ser seleccionadas en lo posible para proporcionar una amplia franja de ventilación, y no necesariamente en la respuesta direccional máxima, proporcionando la mayor efectividad bajo condiciones habituales en las que los cambios de dirección del viento estén sobre ciertos rangos de direcciones en una base horaria, diaria o estacional.

Se deberá procurar siempre una ventilación cruzada para incrementar la convección sobre los ocupantes para una mayor comodidad de los mismos. Para un óptimo enfriamiento ventilativo, un área efectiva suficiente de orificios de entrada y salida será requerida; con los orificios de entrada localizados en una zona de presión positiva y los de salida en una zona de presión negativa.

Los cuartos con apertura de entrada solamente, muestran

que en vientos oblicuos y normales, ésta funciona como ambas (de entrada y salida).

Como los tamaños de las ventanas no son determinados por la ventilación solamente, sino también tienen que tomar en cuenta otros factores arquitectónicos como iluminación, privacidad, seguridad y control solar, una cuestión importante para los fines de la ventilación es como distribuir de la mejor manera una generalmente limitada área de abertura dada. Un parámetro importante en cuanto a esto es la distribución relativa de áreas como entre salidas y entradas. Por lo tanto es conveniente proporcionar aproximadamente iguales entradas y salidas o entradas un poco más pequeñas donde el máximo enfriamiento ventilativo es requerido. Se recomienda utilizar ventanas corredizas que ofrezcan una mínima resistencia al paso del aire y que estén colocadas de tal forma que las corrientes de aire peguen directamente sobre los ocupantes. Las ventanas de persiana son muy ineficientes por lo que su uso no se recomienda. Asimismo debe evitarse colocar aberturas de entrada y salida pegadas a las paredes o techo debido a que el flujo del aire tendería a pegarse a estas superficies y el efecto de enfriamiento ventilativo quedaría nulificado, (26).

En cuanto al sombreado, éste se utiliza para reducir las ganancias de calor excesivas. Algunos de los elementos que producen sombras son mostrados en la figura 4.9,(27).

En climas extremos, el uso de un sistema pasivo se ve muy limitado. Por lo que se deberá complementar con medios mecánicos, y se puede disminuir el tamaño del equipo mediante el uso de algunos dispositivos pasivos como son:

- El uso de doble vidrio para evitar pérdidas o ganancias excesivas según sea el caso, o bien el uso de cristales de buena calidad con bajo contenido de hierro.
- El empleo de muros y techos masivos para retardar la transferencia de calor.
- El uso de materiales altamente higroscópicos que permitan quitar humedad al aire durante el día para permitir un mejor enfriamiento evaporativo.
- Descarga de calor convertido de la radiación solar a la atmósfera mediante el empleo de un sistema de techo inclinado de vigueta y bovedilla.
- Construcción de muros dobles con un espacio intermedio para reducir la transferencia de calor en ambos sentidos.

## 2.- Sistemas de calentamiento de agua.

a) Sistema de Calentamiento Solar de Agua a Circulación Natural o Termosifón.

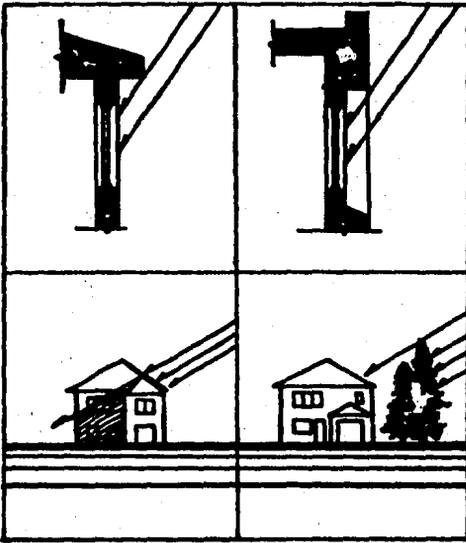


Figura 4.9

Este tipo de sistemas se aplica para uso doméstico. Consta de un colector solar y un tanque de almacenamiento aislado térmicamente. El colector solar se instala en un ángulo de inclinación igual al de la latitud del lugar y orientado hacia el sur (en el hemisferio norte), con el fin de captar la máxima radiación anual. El tanque de almacenamiento se instala en una posición más elevada que el colector, para lograr el efecto de termosifón. El cual consiste en aprovechar la diferencia de temperaturas existente entre el colector y el tanque.

El agua fría contenida en el tanque desciende por gravedad al colector, el cual transforma la energía radiante en calorífica, cediéndola al fluido circulante. El agua caliente menos densa tiende a ascender hacia la parte alta del sistema, estableciéndose así una circulación natural.

En días despejados y al medio día solar, el flujo en un calentador solar es del orden de un litro/minuto por  $m^2$  de superficie de colector. Es muy importante, instalar correctamente el calentador, debido a que un flujo tan pequeño puede ser detenido por un mal diseño. Por este motivo, el uso de colectores solares en forma de espiral, no es muy recomendable debido a que opone una mayor resistencia al flujo que los colectores de tubos verticales paralelos o de placas soldadas.

## Instalación del Sistema.

Para un funcionamiento satisfactorio del calentador solar es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- que la base del tanque de almacenamiento de agua se encuentre a mayor altura que el extremo superior del colector,

- que la longitud de los tubos de conexión entre colector y tanque sea la mínima,

- y que el tubo de agua caliente proveniente del captador tenga el nivel adecuado respecto del fondo del tanque.

## Inclinación y Orientación del Colector Solar.

La cantidad de radiación solar incidente sobre el colector depende de su orientación y de su inclinación respecto a la trayectoria del sol.

Morse y Czarnecki recomiendan un ángulo de inclinación de 0.9 veces la latitud del lugar, así como un ángulo azimutal de 0 grados o sea orientado hacia el sur (en el hemisferio norte), para obtener la máxima radiación directa anual. Estas recomendaciones son válidas desde el punto de vista geométrico de la componente directa de la radiación solar y no incluye la componente difusa de la misma. Por lo tanto para considerar

a esta componente, habrá que tomar en cuenta la distribución local de la nubosidad.

**Altura entre el tanque y el colector solar.**

Se recomienda una distancia mínima de 60 centímetros entre el extremo superior del colector y el nivel del tubo de salida de agua fría del tanque de almacenamiento.

**Longitud de los tubos de conexión.**

La longitud de los tubos de conexión entre el colector y el tanque de almacenamiento debe ser la mínima. Teniendo cuidado de evitar cambios bruscos de dirección, con el fin de disminuir la caída de presión en el sistema.

**Altura entre el tanque y el tubo de agua caliente.**

Es común conectar el tubo de agua caliente cerca de la parte alta del tanque, generalmente a una altura igual a las dos terceras partes del mismo. De tal forma que la cabeza de agua sea la máxima y también, la estratificación de agua en el tanque de almacenamiento sea mayor, manteniendo así, un gradiente de temperatura que permita un mayor flujo de agua.

**Aislamiento.**

Es de vital importancia para cualquier sistema de calentamiento solar de agua reducir las pérdidas de calor por conducción. Esto puede lograrse mediante un buen aislamiento en las partes lateral y posterior del colector, en los tubos de entrada y salida de agua, así como en el tanque de almacenamiento.

#### Diámetro de la tubería.

Los diámetros más recomendables para las tuberías que conectan el colector con el tanque de almacenamiento son de 13 mm (1/2") o de 19 mm (3/4").

Es muy importante instalar el mínimo número de codos de 90 grados, así como evitar reducciones o aumentos en el diámetro de la tubería. Si se requiere el uso de válvulas es recomendable que sean de compuerta, evitando el uso de válvulas de globo o de retención (check).

#### Temperaturas requeridas para diversos usos:

Para el lavabo	35°C
Para la ducha	42°C
Para la cocina	50°C
Para la lavadora	60°C

Consumo diario medio por persona:

Mínimo	30 l/día
Medio	50 l/día
Máximo	75 l/día

#### Dimensionamiento de un Calentador Solar.

Para el diseño de un calentador solar se deben considerar los siguientes factores:

- distribución anual de la radiación solar en la localidad.
- temperaturas mínimas registradas.
- número de habitantes en la vivienda.
- análisis de los obstáculos existentes en el sitio probable para su instalación.
- tipo de calentador convencional de apoyo (gas, eléctrico, leña, etc.).
- velocidades de viento.

Si se desea cubrir casi la totalidad de las necesidades durante todo el año, sería necesario basarse en la cantidad de energía captada en enero (para el hemisferio norte). Lo que implicaría, una disposición de agua caliente en verano mayor que la requerida, además de un posible desembolso para el posible usuario.

En la práctica, el área de los colectores debe ser calculada para satisfacer de un 50 a 75% las necesidades

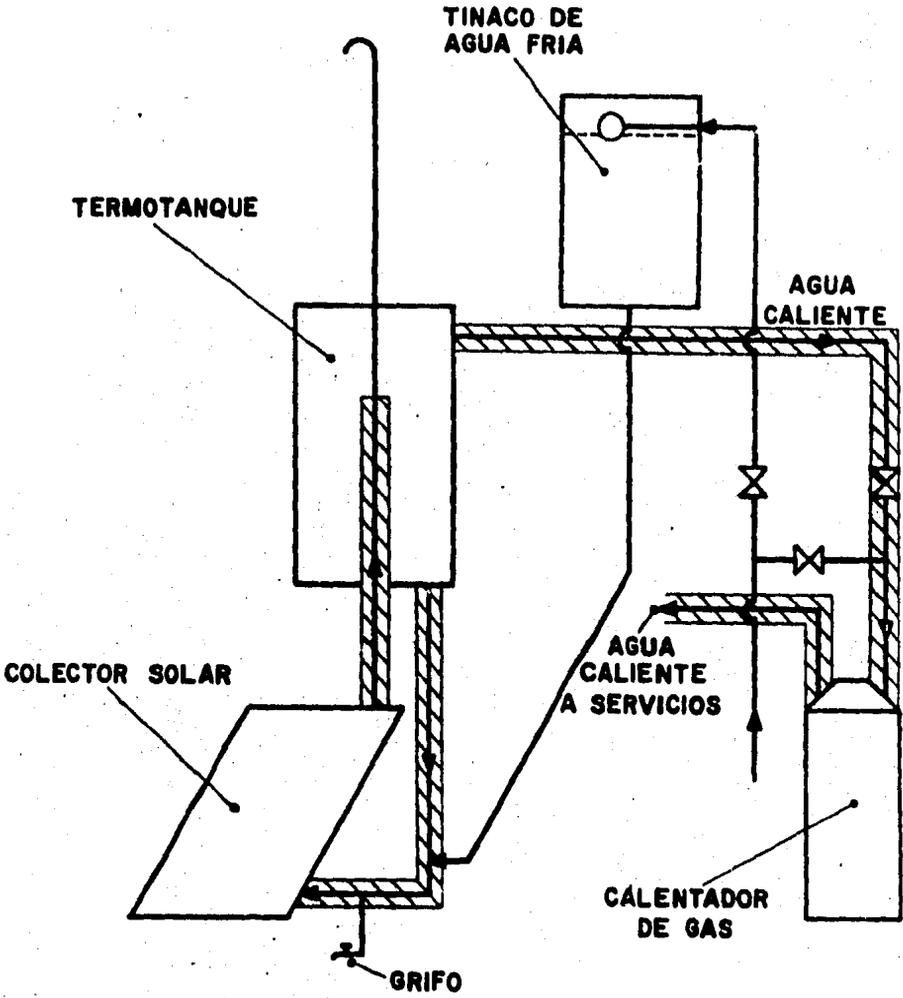


DIAGRAMA TÍPICO DE UNA INSTALACION DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PARA USO DOMESTICO. (TERMOSIFON)

totales de agua caliente de la vivienda. Un metro cuadrado de colector proporciona entre 50 a 100 litros de agua caliente (40 a 60°C), dependiendo de la disponibilidad de energía solar de la localidad.

En los lugares donde se registran temperaturas inferiores a 0°C, aún cuando en México no es muy común, se requiere tomar previsiones para evitar que las tuberías del colector se rompan.

Existen dos alternativas, para proteger al calentador solar del hielo.

- Vaciar el circuito en los períodos durante los cuales se registren bajas temperaturas.

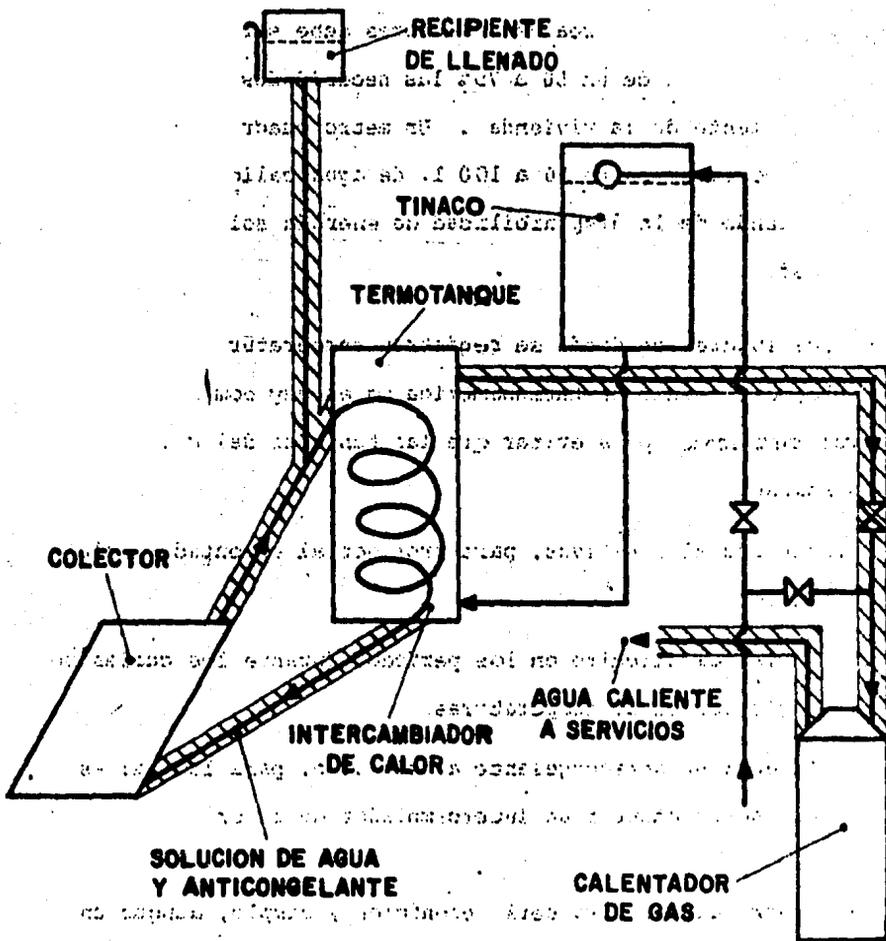
- Agregar un anticongelante al circuito, para lo cual es necesario adaptar un intercambiador de calor.

La primera alternativa será económica y simple, aunque un tanto molesta, debido a que el usuario debería vaciar el colector generalmente en períodos nocturnos.

La segunda alternativa consiste en colocar un intercambiador de calor en el tanque de almacenamiento conectado al colector solar. En este circuito, se colocará una solución de agua y anticongelante (p.e. etilenglicol).

El rendimiento del calentador es menor que el de diseño común, pero no habrá problema de rotura de tuberías.

La solución ideal sería que existiera un material resistente a la dilatación y de bajo costo, que hasta la fecha no se ha desarrollado.



**DIAGRAMA DE INSTALACION DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA PARA USO DOMESTICO EN SITIOS CON TEMPERATURAS BAJAS (0°C).**

**b) Sistemas de Calentamiento de Agua a Circulación Forzada.**

Cuando se requiere calentar grandes volúmenes de agua o debido a la imposibilidad de instalar un sistema operado por termosifón, se recurre al uso de una bomba para la circulación del fluido (circulación forzada). Eso generalmente sucede en edificios, hoteles, industrias, hospitales, baños, así como para equipos de aire acondicionado o refrigeración. En estos casos, las temperaturas de operación fluctúan entre los 40 y 100°C.

Bajo esta situación, se deben considerar los siguientes factores para el buen diseño de un sistema a circulación forzada:

- orientación e inclinación de los colectores.
- arreglo óptimo en el banco de colectores.
- potencia de la bomba.
- diámetro óptimo de tuberías.
- controles.

Es muy importante señalar que cuando se instala un gran número de paneles solares, se debe buscar una distribución homogénea del fluido y una mínima caída de presión en el arreglo.

Experimentalmente se ha determinado que, cuando se instalan los colectores solares en paralelo, el flujo de agua tiende a ser mayor en los extremos que en el centro.

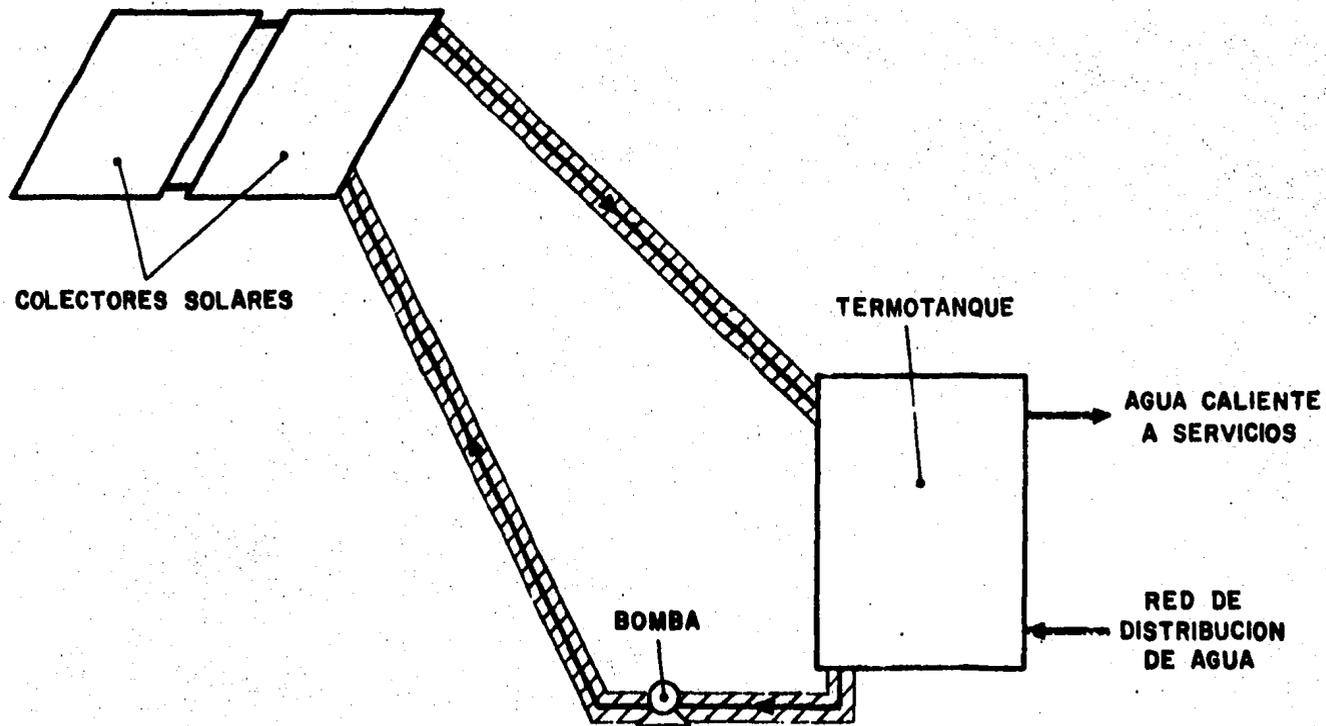


DIAGRAMA DE INSTALACION DE UN SISTEMA SOLAR DE CALENTAMIENTO DE AGUA A CONVECCION FORZADA.

En este último sitio, se alcanzan temperaturas superiores, generándose mayores pérdidas de calor y en consecuencia reduciendo la eficiencia global del arreglo.

En arreglos en serie, la temperatura del agua se va incrementado sucesivamente conforme circula por cada colector lográndose diferencias de temperaturas del agua cada vez menores debido a que la eficiencia de un colector solar disminuye con la temperatura de operación.

En conclusión, para lograr una distribución más uniforme del fluido circulante los bancos de colectores solares se deben instalar en arreglos serie-paralelo.

Por otra parte, la bomba del circuito debe funcionar cuando el agua contenida en el colector esté más caliente que la del termotanque (p.e.  $10^{\circ}\text{C}$ ). En este caso, el control proviene de la comparación hecha a cada instante entre las dos temperaturas, mediante un termostato diferencial.

### 3.- Generación de energía eléctrica.

Un sistema fotovoltaico es una instalación cuya finalidad es la conversión directa de energía solar a eléctrica.

Desde el punto de vista tecnológico se puede considerar a una celda como la unidad más pequeña de generación fotovoltaica manufacturada individualmente. La potencia entregada por una fotocelda es relativamente

pequeña por lo cual es necesario conectar adecuadamente un conjunto de celdas en un armazón que las sostenga y que permita su fácil manejo. Así, un módulo fotovoltaico es un bloque que contiene un número de celdas eléctricamente conectadas y encapsuladas en una armadura a manera de soporte. En un módulo fotovoltaico generalmente se hacen conexiones tanto en serie como en paralelo con el fin de obtener cierto nivel de voltaje y potencia de salida. Obviamente no conviene hacer todas las conexiones en serie porque el atrofiamiento de una celda traería como consecuencia que la potencia entregada por el módulo fotovoltaico fuera nula. Los módulos pueden estar formados por celdas de diferentes formas lo cual hace que varíe el área colectora efectiva por módulo.

El área efectiva de colección de un módulo es el área del módulo cubierta por fotoceldas. La fracción de área cubierta por las celdas en el módulo fotovoltaico tiene valores típicos que van del 75 al 90%; los cuales dependen de las formas de las fotoceldas y de su distribución en el módulo.

Para fines prácticos es conveniente instalar un conjunto de módulos en estructuras firmes. Al conjunto de módulos debidamente instalados y conectados se les llama el arreglo colector. La estructura del arreglo colector tiene la finalidad de integrar los voltajes y potencias entregados por los módulos en los niveles requeridos por la demanda energética. El módulo es el más pequeño

montaje de celdas solares interconectadas y protegidas del medio ambiente; es el bloque de construcción básico del arreglo colector.

Un sistema fotovoltaico típico consiste de:

- un arreglo colector, una construcción y un lugar adecuado (armaduras para montar los módulos, cimentación y estructuras de sostén, equipos de seguridad, terreno o desmontados y nivelados);
- los subsistemas de almacenamiento de energía (baterías, recinto apropiado, instalación);
- elementos eléctricos de regulación y control (cables, circuitos e instrumentos de control, circuitos de manejo de potencia, reguladores de voltaje, acondicionadores de potencia, inversores d.c.-a.c., instalaciones adecuadas).

La figura 4.10 muestra un diagrama de un sistema fotovoltaico sencillo. El almacenamiento de energía típicamente consiste de baterías de plomo-ácido conectadas en serie y/o en paralelo para suministrar el voltaje y potencia requeridos. La capacidad de almacenamiento suficiente debe ser prevista, conociendo los requerimientos de carga específicos y tomando en cuenta las variaciones en la insolación durante el día y en el transcurso del año. Los reguladores de voltaje (R) están con el fin de proteger las baterías de una sobrecarga y una descarga excesiva y para proteger las cargas de voltajes extremos. El diodo de bloqueo (D) está con la finalidad de proteger las celdas solares del arreglo.

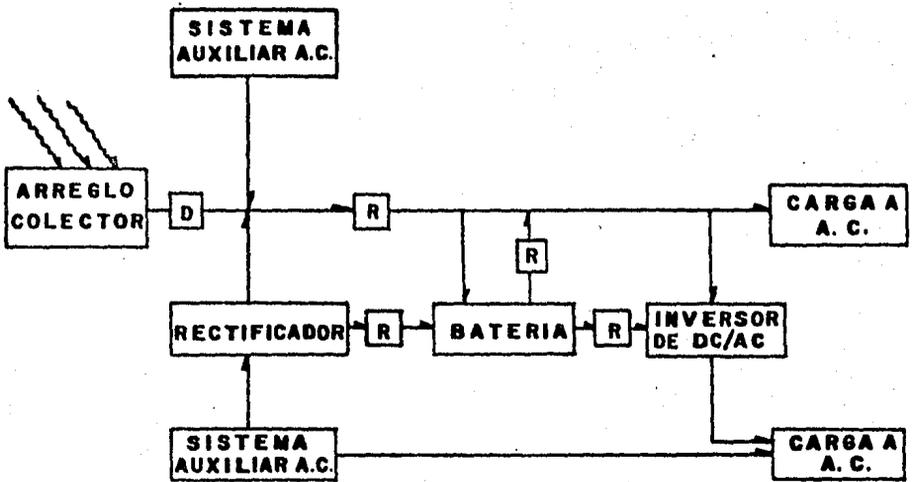


Figura 4.10 Representación esquemática de un sistema fotovoltaico.

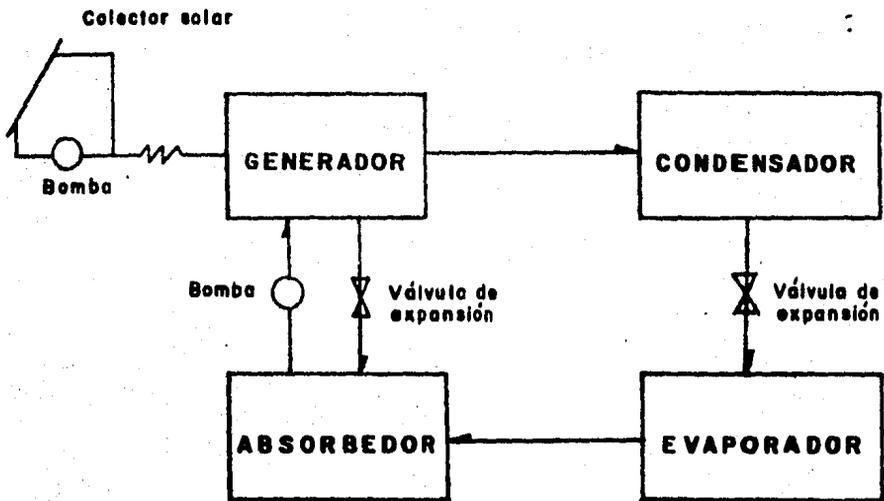


Figura 4.11 Ciclo de refrigeración por absorción.

El dimensionamiento óptimo del arreglo colector, en el diseño de un sistema fotovoltaico, consiste en satisfacer los requerimientos de electricidad en base al patrón de insolación y a la temperatura de los módulos. Se tienen programas de computación que pueden diseñar los sistemas con gran precisión, que incluyen no solo el dimensionamiento y orientación del arreglo, sino también de los posibles sistemas auxiliares y de almacenamiento.

#### 4. Refrigeración y aire acondicionado

El empleo de la energía solar para la producción de frío y el acondicionamiento activo del aire es una idea muy atractiva, ya que existe una correlación entre la demanda máxima de frío y la disponibilidad máxima de energía solar.

En los países de insolación más elevada donde los requerimientos de frigorías son los más importantes y, en muchos de los casos, el uso de sistemas de aire acondicionado responde más a una necesidad que a un lujo, (28).

En general existen dos tipos de sistema de refrigeración:

-sistemas de refrigeración por compresión

mecánica (convencional) que utiliza energía eléctrica para su funcionamiento.

-sistemas de refrigeración por absorción que requieren de una fuente térmica para su funcionamiento la cual puede ser:

- carbón
- calores de desecho en generadores de vapor.
- vapor ya condensado a la salida de las turbinas de vapor
- pozos geotérmicos
- energía solar, etc.

El funcionamiento dependerá de las temperaturas que se puedan obtener con cada una de dichas fuentes.

Experiencias que se han realizado con colectores solares planos indican temperaturas hasta de 95°C y con colectores solares de tubos evacuados hasta de 120°C. Asimismo investigaciones que se realizan en el Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM indican que el intervalo en que funcionan los colectores solares es el mismo que el intervalo que se necesita en el generador del refrigerador por absorción.

Las partes fundamentales del ciclo de refrigeración por absorción son: generador, condensador, válvula de expansión, evaporador y absorbedor.

El principio de operación de este tipo de refrigeración es el siguiente: una solución es formada

bajo las condiciones de presión y temperatura establecidas por el equilibrio termodinámico de la mezcla (gas-líquido de concentración  $x_i$ ) como amoníaco-agua, ésta se introduce en el generador en donde al suministrarle calor proveniente de la fuente solar, el refrigerante se evapora separándose de la mezcla con una concentración final  $x_f$  en donde  $x_i > x_f$ ; los vapores del refrigerante son licuados en el condensador disipando una cierta cantidad de calor, ya en forma líquida pasa al evaporador a través de una válvula de expansión en donde al evaporarse absorbe calor del medio exterior, efectuándose el efecto frigorífico. A la salida del evaporador los vapores son absorbidos en el absorbedor disipando una determinada cantidad de calor, formando nuevamente la concentración inicial  $x_i$ , enviándose nuevamente al generador para iniciar otro ciclo (fig. 4.11); para proporcionar aire frío a la edificación se puede utilizar un sistema de refrigeración por absorción usando agua como fluido refrigerante y bromuro de litio (LiBr) como absorbente (fig. 4.12).

Un sistema de calefacción solar se muestra en la figura 4.13, (29).

#### Otras aplicaciones

La energía solar también se puede aplicar en:

-calentamiento de albercas. Sistemas similares a los

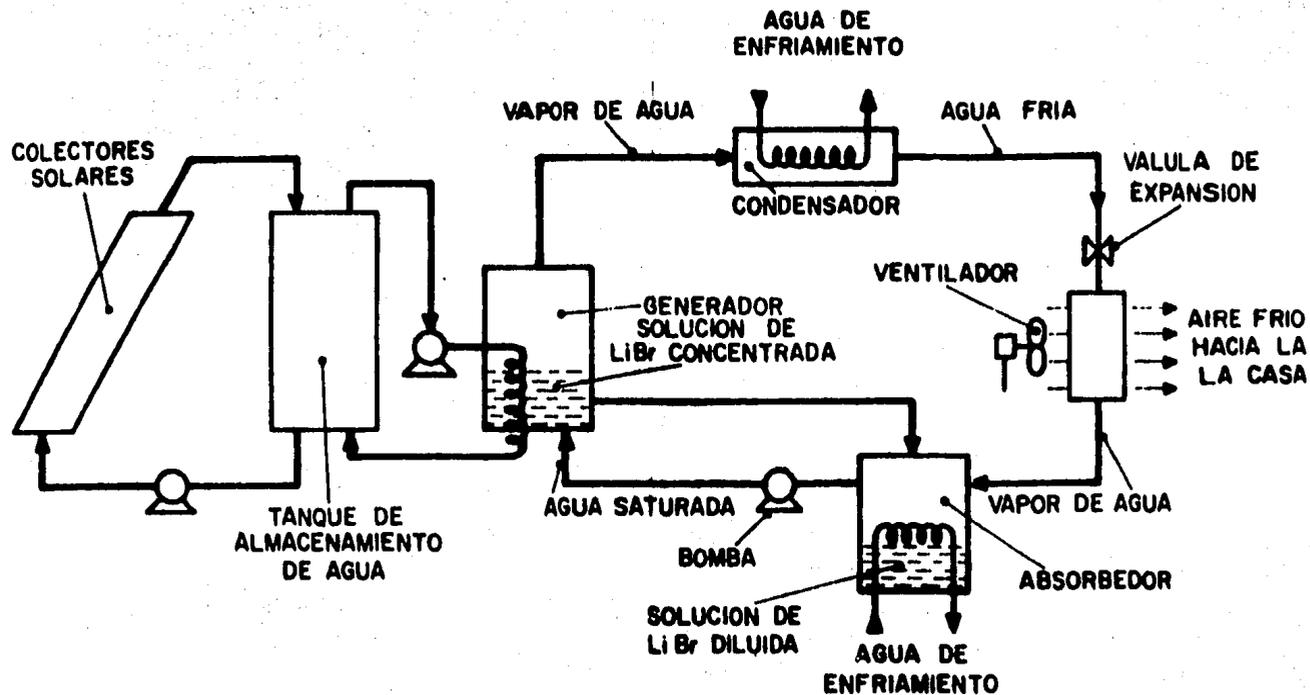


Figura 4.12 SISTEMA DE REFRIGERACION POR ABSORCION USANDO AGUA COMO FLUIDO REFRIGERANTE Y BROMURO DE LITIO (LiBr) COMO ABSORBENTE.

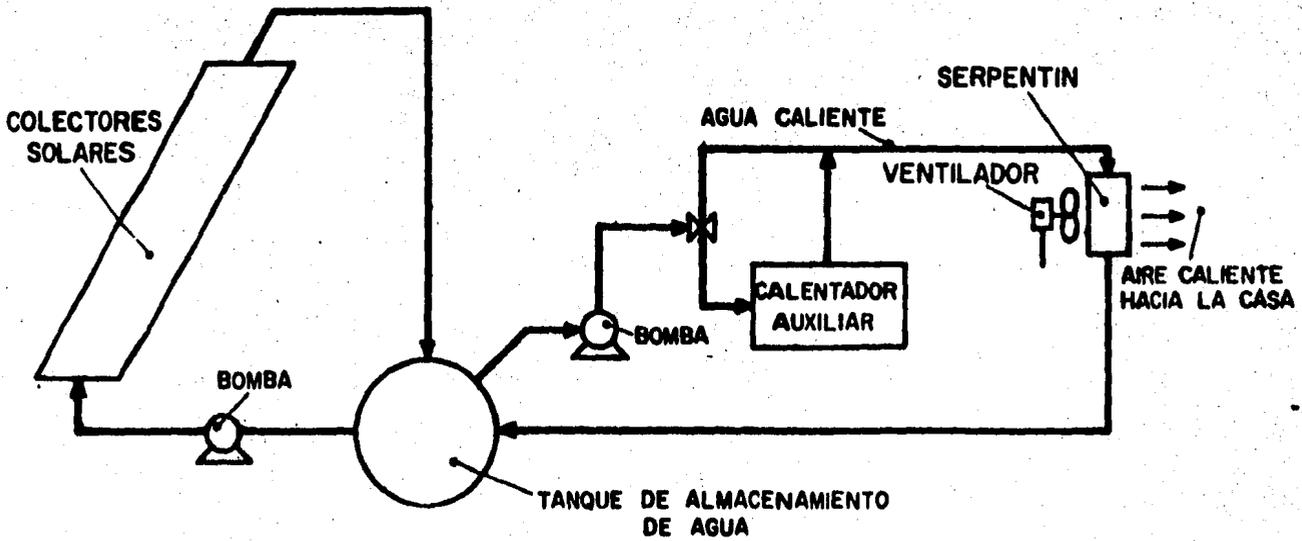


Figura 4.13 SISTEMA DE CALEFACCION USANDO AGUA COMO FLUIDO DE OPERACION

que fueron descritos en los sistemas de calentamiento de agua a circulación forzada.

-secado y conservación de granos

-estufas y hornos solares.

-destilación de aguas salobres y saladas.

## Capítulo V. La energía solar como recurso y la política en México.

### 1.- Panorama general y políticas de desarrollo.

El desarrollo de la energía solar como recurso en México se ve obstaculizado por el subsidio que se le da a los combustibles fósiles, por lo que es difícil competir contra éstos, la energía solar no está subsidiada (a pesar de que nuestra zona geográfica resulta atractiva desde el punto de vista de disponibilidad del recurso solar) y aunado a esto los aparatos utilizados son muy costosos.

Sin embargo, se piensa que el mercado irá creciendo paulatinamente conforme la gente se concientice de las características del ambiente y de la futura escasez de otras fuentes de energía.

Según el Dr. José Luis Fernández Zayas, investigador del Instituto de Ingeniería U.N.A.M., la tecnología con que se cuenta está completamente probada; ya que muchos de los productos internos se han exportado. Para el calentamiento de agua sobre todo, se está desarrollando una tecnología que está empezando a ser la más avanzada del mundo, lo mismo que para el secado solar de granos; en cuanto a los procesos industriales como pasteurizado,

procesamiento de alimentos, esterilizado, etc., se ha dominado ya una tecnología que tendrá interés comercial en el futuro.

Sin duda, las actividades desarrolladas nos colocan a la cabeza de América Latina y en un sitio de privilegio en la comunidad de países desarrollados. Sin embargo, el impacto de la actividad científica y tecnológica en los avances industriales es poco notable.

La causa es compleja y de orígenes diversos. Por un lado, el impulso del gobierno federal a esta área ha sido esporádico, discontinuo y escaso, además de que en ocasiones ha sido equivocado; por otro lado, hace falta un largo período y mucha difusión para alterar hábitos y tradiciones sociales que, curiosamente, se contraponen con el avance de esta fuente de energía; asimismo, la infraestructura es raquítica e insuficiente para impactar decisivamente el medio energético.

En otras acciones del gobierno, además de apoyar las tareas de investigación y desarrollo desde hace unos diez años en forma más o menos constante, pueden mencionarse algunas que ilustran las demás. Hace dos sexenios se implantó el Plan Solar Tonatiuh, que pretendía instalar y operar una docena de bombas de agua pequeñas para proporcionar este líquido a otras tantas poblaciones, a precios millonarios de adquisición. El proyecto se desplomó por la incompetencia de los técnicos extranjeros para satisfacer los requerimientos de la oferta

y por la falta de voluntad del siguiente gobierno de costear tan extravagante experimento. Hasta la más pequeña refacción debía traerse de Europa y ser instalado por un técnico europeo. El resultado fue un desprestigio de la tecnología, del país que proporcionó la "contraparte" y hasta de la idea de explotar la energía solar.

Hace poco menos de seis años se inició otra aventura -ahora con otro país europeo- para proporcionar electricidad, agua potable y refrigeración a un pequeño poblado de pescadores en Baja California Sur. Nuevamente se ofrecía una tecnología inmadura como si estuviera a nivel de comercialización internacional; nuestros representantes cayeron en el engaño y se incurrió a otro fracaso. El gobierno actual se niega, y con sobrada razón a financiar a un costo de varios cientos de millones de pesos al año el desarrollo tecnológico del extranjero, a cambio de recibir servicios de calidad dudosa para un poblado de algunas docenas de familias. Los resultados, en esa misma perspectiva, no son muy distintos del Plan Tonatiuh. Lo triste es que solo vimos pasar la oportunidad y los innumerables millones gastados no nos dejaron más que vergüenza y desprestigio; nuestro desarrollo recibió un impulso negativo.

Más dañino aún para la masificación de los utensilios solares resulta la estructura económica de nuestro panorama energético. Con el fin de propiciar el desarrollo y frenar la inflación, se subsidian la

electricidad y los derivados del petróleo; algunos, como el gas licuado de uso doméstico, se importa a precios considerablemente más altos que los que paga el consumidor. La industria solar, carente de subsidios, se encuentra en tremenda desventaja y sus productos se emplean apenas en algunos casos marginales.

Ha faltado también imaginación y atrevimiento de los sectores industrial, público y privado. Ya era hora de que una fracción importante de hoteles, restaurantes, hospitales, edificios de vivienda y tipo comercial, emplearan la energía solar para lo que resulta más costeable: producción de calor. Este calor, además de usarse en el calentamiento de agua, podría destinarse a diversos procesos industriales, como la deshidratación, la paturización, el lavado y esterilizado de envases y el secado de productos perecederos. Sólo en casos excepcionales se hace, como en algunas industrias madereras en el norte del país. Diversos estudios demuestran ya la viabilidad económica de precalentar con energía solar el agua de calderas.

Para tener éxito en las aplicaciones solares rurales hacen falta varias cosas que no hemos aprendido a hacer bien. Hay que recordar que todo nuevo desarrollo, una vez superados los obstáculos que toca al científico resolver, debe pasar inevitablemente por las etapas de prueba de laboratorio, ensayo en planta piloto, operación a nivel de demostración, depuración continua del diseño original

y, hasta el final, implantación en el sitio.

Estas etapas se hacen en una sola, cuando el representante en turno de la dependencia federal en cuestión solicita que, en un año y a un costo dado, se desarrolle, se instale y se opere exitosamente un dispositivo que jamás antes habíamos visto en México. El riesgo es, como lo demuestra la historia, bien elevado. Aunque, por otro lado, así nos hemos hecho de refrigeradores solares, secadores, estufas solares y tantos otros aparatos que no tendríamos a la vista si no hubiese sido por la audacia de gobernantes e investigadores, (30).

## 2.- Derecho al sol.

Ya durante el siglo II d. de C. el derecho romano establecía como ofensa civil colocar obstáculos que impidiesen la exposición a los rayos del sol de una estructura diseñada para recibirlos, (6).

Actualmente el uso racional de energía ha venido a ser una importante meta en los modernos códigos de edificación. Todos los aspectos en que las regulaciones se han desarrollado, técnica, económica, ambiental, higiénica, estética tanto como la seguridad misma, debe ser obtenida para la optimización del consumo total de energía en edificios.

En esta época los códigos y regulaciones en muchos

países están en proceso de legalización o discusión y serán puestos en práctica en un futuro cercano.

Los códigos se refieren principalmente a las cualidades térmicas de los materiales, las condiciones climáticas y los diferentes usos del edificio. Los países más avanzados en este tipo de legislación son Estados Unidos, Alemania Federal y Suecia, (31).

En México deberían de tomarse esta clase de medidas para un mejor aprovechamiento de esta fuente energética.

### 3.- Panorama nacional de investigación.

En 1980 la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial ( SEPAFIN ) dió a conocer un programa de energía para el país, con metas para 1990 y proyecciones al año 2000. Dicho programa representa una visión oficial del gobierno (quizás la única global) acerca del futuro energético del país; la energía solar está considerada dentro de este programa y uno de los objetivos de este programa es diversificar las fuentes energéticas contribuyentes a la oferta interna.

Actualmente las siguientes instituciones desarrollan en México actividades de investigación en sistemas solares térmicos pasivos:

-Instituto de Investigaciones en Materiales, U.N.A.M.:  
Estudio de la operación del Laboratorio de Energía Solar en Temixco Morelos (3700 m\*\*2 de construcción con sistemas

pasivos), algoritmos de simulación de la operación térmica en computadora, almacenamiento de calor en materiales de construcción, enfriamiento por evaporación de los materiales de construcción, sistemas pasivos contruidos con estructuras de ferrocemento, pruebas y caracterización de materiales locales para su uso en sistemas solares térmicos pasivos.

-Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Arquitectura y Arte, Unidad Profesional Coatepec: Helioarquitectura.

-Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey: Proyecto para el diseño y construcción de una casa solar con sistemas de climatización activos y pasivos.

-Instituto Tecnológico Regional de Oaxaca: Estudios exploratorios en Heliodiseño.

-INFONAVIT: Tres programas piloto de climatización solar pasiva en casas habitación, Conjunto habitacional IMAN-Perisur.

-S.A.H.D.P.-DIGAASES: Proyecto SONNTLAN-Las Barrancas: Sistema Integral Autosuficiente (incluyendo heliodiseño). Proyecto SONNTLAN-Mexicali: seis casas que incluyen heliodiseño.

-Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco: Sistemas integrales autosuficientes (incluyendo heliodiseño).

-Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa:

Dehumidificación del aire para climatizar viviendas.

-Universidad autónoma de San Luis Potosí (Unidad del Hábitat): Casa autosuficiente energéticamente (incluye heliodiseño).

-Universidad de Guadalajara: Helioarquitectura.

-Universidad Iberoamericana: Helioarquitectura.

-Universidad La Salle: Helioarquitectura.

Una buena parte de las unidades experimentales y de demostración construidas en el país pueden considerarse reproducción y adaptación de desarrollos tecnológicos realizados en otros países. Existen relativamente poca actividad en la caracterización de los elementos constructivos comúnmente empleados en México como elementos potencialmente aprovechables en sistemas térmicos pasivos de bajo costo. Muchos de los desarrollos nacionales se han centrado en buena parte en la vivienda para familias con niveles de ingresos medios-altos y altos dirigidos a viviendas de interés social.

Los S.T.P. es una de las áreas de aprovechamiento de la energía solar a la que en años recientes se ha dedicado mayor atención en el país.

En lo que respecta a los sistemas térmicos estacionarios, los colectores solares planos han sido los que han recibido mayor atención en México. Los problemas de interés actual serían los de procesos de producción a

nivel industrial y reducciones de costos. Los colectores han sido fabricados y adaptados con éxito en diversas comunidades del Estado de Puebla bajo la promoción activa de SAHOP.

Los colectores solares planos se fabrican en el país desde hace más de 30 años aunque los niveles de producción siempre han sido muy pequeños. Actualmente existen varios fabricantes tanto en el D.F. como en otras ciudades importantes de la República. Si los colectores planos y el gas propano fuesen tratados de la misma manera dentro de la política energética nacional, existirían mecanismos que harían a los calentadores solares económicamente viables en el país. En abril de 1982, los sistemas de colectores solares de producción nacional tenían un precio de fábrica aproximado de 7,500 pesos/m<sup>2</sup> (incluyendo un tanque de almacenamiento de 250 lt como parte del sistema) o de unos 10,000 pesos/m<sup>2</sup> si se incluye la instalación.

Con respecto a los colectores tubulares en México ha habido muy poca actividad en la investigación y desarrollo de los mismos. Actualmente solo una institución, el Instituto de Investigaciones en Materiales, U.N.A.M. se interesa por estudiar colectores tubulares o caloriductos, habiéndose incluido el tema en un convenio de colaboración firmado entre E.U. y México. Por otro lado no existe actividad comercial en el país con relación a

caloriductos o colectores solares tubulares.

A nivel nacional existe una actividad casi nula en el campo de los concentradores estacionarios.

## CONCLUSIONES:

Estamos en buen momento de planear adecuadamente el futuro consumo de energía en México.

La creciente demanda de energía ha obligado a la construcción de obras de infraestructura hidro o termoeléctricas, sin considerar las repercusiones que tienen en el medio ambiente. Todos los procesos de abastecimiento de energía eléctrica que disponemos arrojan calor al ambiente, lo que a fines de este siglo según algunos científicos producirá efectos catastróficos al fundirse parte de los casquetes polares y afectarse irreversiblemente los ciclos climáticos del planeta.

El uso de otros tipos de energía no contaminantes como la eólica y la solar a un nivel plenamente comercial está previsto para después del año 2000; sin embargo es necesario impulsar proyectos de investigación al respecto para ser totalmente autosuficientes desde el punto de vista tecnológico, y más tomando en consideración la facilidad de disponer de éste recurso por la situación geográfica privilegiada de México.

El desarrollo tecnológico contemporáneo y la disponibilidad de energéticos hasta hace poco baratos, propiciaron el desarrollo acelerado de una sociedad dependiente del petróleo, en la que particularmente el sector de la construcción se vio envuelto en estilos arquitectónicos dependientes de sistemas de

acondicionamiento ambiental e iluminación artificiales. Así fueron proliferando diseños arquitectónicos más libres de tal forma que el diseñador ha sobreestimado su capacidad tecnológica de construcción, edificando más por el impacto visual que la construcción pueda reflejar, que por proporcionar a los ocupantes espacios cuya ambientación resulte compatible con el entorno.

Los sistemas pasivos e híbridos de climatización involucran técnicas y procesos de adecuación ambiental, muchos de ellos conocidos y aplicados desde hace siglos pero que sin embargo siguen siendo vigentes.

Actualmente se ha comprobado la eficacia de los equipos solares en la edificación, principalmente para el calentamiento de agua, producción de energía eléctrica, aire acondicionado y refrigeración. Sin embargo la comercialización de éstos se ve obstaculizada por el subsidio a los combustibles fósiles así como a la falta de incentivos a los productores y consumidores de este tipo de tecnologías.

## ANEXO

El B.T.U. (British Thermal Unit) es aproximadamente la cantidad de energía necesaria para elevar un grado Fahrenheit una libra masa de agua.

La caloría (cal) es la cantidad aproximada de energía que se requiere para elevar un grado centígrado un gramo de agua.

El electrovolt (eV) representa la cantidad de energía necesaria para suministrar a un electrón el potencial de un Volt.

1 B.T.U.	=	1.05506	E+03	J
•	=	7.783	E+02	lb-pie
•	=	2.52	E+02	cal
•	=	3.931	E-04	hp-hora
•	=	1.075	E+02	kg-m
•	=	1.000	E-15	quad

1 cal	=	3.9685	E-03	B.T.U.
•	=	4.186		J
•	=	4.132	E+02	l-atm.
•	=	2.61	E+19	eV <sub>e</sub>

1 J = 9.48	E-04 B.T.U.
▪ = 9.872	E-03 l-atm
▪ = 0.7376	lb-pié
▪ = 1.0	E+07 erg
▪ = 0.2389	cal
▪ = 0.102	Kg-m
▪ = 2.77	E-07 Kw-hora

Un M.B.D.O.E. es equivalente a un millón de barriles diarios de petróleo.

1 MBDOE = 5.8	E+06 B.T.U.
▪ = 76.0	E+06 T.m.c.a.
▪ = 57.0	E+09 M.c.g.a.
▪ = 62.0	E+02 Teravatios/hora

donde: T.m.c.a. = toneladas métricas de carbón por año; M.c.g.a. = metros cúbicos de gas natural por año.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \text{ E-19 J}$$

## BIBLIOGRAFIA:

- (1) Asimov, Isaac, "Los egipcios", Alianza Editorial Mexicana, México, 1983.
- (2) Appendini, I., Zavala, S., "Historia Universal, Antigüedad y Edad Media", Porrúa, México, 1982.
- (3) Sagan, C., "Cosmos", Editorial Planeta, Barcelona, 1982.
- (4) Navarro, C., "La energía Solar en la Edificación", Revista Obras, Editorial Expansión, México, 1984.
- (5) Margaleff, R., "Energía", C.E.C.S.A., México, 1984.
- (6) Alonso, C., Rodríguez, V., "Diagnóstico y Pronóstico sobre la Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica", Instituto de Ingeniería, UNAM, Tomo I, México, 1982.
- (7) Esquinazi, S., "Fluid Mechanics and Thermodynamics

of our Environment", Academic Press, New York, 1975.

(8) Bernal, D., "La Ciencia en la Historia", UNAM, México, 1959.

(9) Gordon, Ch., "Los Orígenes de la Civilización", F.C.E., México, 1978.

(10) Alonso, C., Rodriguez, V., "Diagnóstico y Pronóstico sobre Energía Solar, Biomasa y Energía Eólica", Instituto de Ingeniería, UNAM, Tomo II, México, 1982.

(11) "Como Funciona", Salvat Editores", España, 1982.

(12) WAES, "Energía: Perspectivas Mundiales 1985-2000", F.C.E., México, 1977.

(13) Sámano, D., Notas para el Curso sobre Enfriamiento, México, Agosto de 1985.

(14) Reynolds, W., Perkins, H., "Ingeniería Termodinámica", McGraw-Hill, México, 1977.

(15) Resnik, R., Halliday, D., "Física", C.E.C.S.A., Tomo I, México, 1974.

(16) Vázquez, N., "Tablas de Equivalencias".

(17) Kreith, F., "Principios de Transferencia de Calor", Herrero Hermanos Sucesores, S. A., México, 1970.

(18) Hernández, G., "Aire Acondicionado y Refrigeración", Limusa, México, 1975.

(19) Guyton, A., "Tratado de Fisiología Médica", Editorial Interamericana, Quinta Edición.

(20) ASHRAE Handbook, 1981 Fundamentals, Atlanta, 1981.

(21) Estrada, V., "Análisis Crítico de Procedimientos para estimar la Radiación Solar, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1985.

(22) Koler, J., "A Fresh Look at Solar Cooling", Keene, N.H.

(23) Almanza, R., López, S., Manual 378: "Utilización de las Superficies Selectivas en la Energía Solar", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1976.

(24) Sobin, H., "Abstracts", College of Architecture, University of Arizona, Tucson.

(25) Holtz, M., Wayne, P., Kammerud, R., "A Classification Scheme for the Common Passive and Hybrid Heating and Cooling Systems", Berkeley, California, 1979.

(26) Sobin, H., "Window Design for Pasive Ventilative Cooling: An Experimental Model-Scale Study", College of Architecture, University of Arizona, Tucson.

(27) "A Manual Method for optimizing low energy/Passive Solar Home Designs", HUDAC/Ontary Ministry of Energy, Ontario, 1984.

(28) Bufete de Tecnologia Solar, S.A., "Curso Latinoamericano de Actualización Sobre el Aprovechamiento de la Energía Solar en las Edificaciones", México, D.F., 8, 9 y 10 de Abril de 1981.

(29) Gutierrez, E., Acevedo, R., Buendia, D., Tesis: "Estudio Experimental Sobre la Utilización de Helio en el Ciclo de Refrigeración por Difusión", Facultad de Ingeniería, UNAM, 1981.

(30) Semanario de la Facultad de Ingeniería, No. 29, UNAM, 14 de Agosto de 1985.

(31) Kreider, F., Kreith, F., "Solar Handbook", McGraw-Hill, New York, 1981.