



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGON**

**“UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE  
ENERGÍA SOLAR”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
(área mecánica)  
PRESENTAN:

**EDGAR ROJAS TORRES  
JUAN CARLOS RODRIGUEZ JIMENEZ**

ASESOR: Ing. Jorge Antonio Rodríguez Luna



MEXICO , 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# JUAN CARLOS RODRIGUEZ JIMENEZ

## DEDICATORIA

### *A MIS PADRES.*

*Ana María Jiménez Romero  
Marcos Rodríguez Brito*

*Gracias a ellos por apoyo y comprensión,  
mas en este último año, que pude terminar  
esta meta tan importante.*

### *A MIS HERMANAS.*

*Lidia, Leticia, Patricia y Lourdes.*

*A ellas por su gran apoyo incondicional  
en el momento que mas las necesite mil  
gracias.*

### *A MI FAMILIA:*

*Tíos, tías, primos, primas que ayudaron  
y me demostraron su cariño y su fuerza  
para superar esta prueba que la vida me puso  
y en especial a KAREN que deseo que llegue  
a lograr todas sus metas.*

### *A MIS AMIGOS:*

*Jorge L. Roberto M, José Luis S. Edgar R.  
Ricardo H. José Luis. y Héctor C  
Alejandro Z. Armando M. Sandra Z. a ella,  
que me enseñó que, "que bonito es lo bonito"  
A todos muchas gracias.*

*GRACIAS DIOS MIO  
Por darme otra oportunidad*

*Juan Carlos Rodríguez Jiménez.*

## *EDGAR ROJAS TORRES*

*A MI FAMILIA:*

*Salatiel Rojas Muñoz  
Violeta Torres Sanchez*

*Gracias mama por estar conmigo en los momentos más complicados y cuando más apoyo necesitaba, por escucharme y por creer en mí. Papa te agradezco tu confianza y apoyo incondicional, Muchas Gracias a ambos por ser un ejemplo para mí, los quiero mucho.*

*José Luis Rojas Torres  
Joran Rojas Torres  
Jannet Vazquez Montiel*

*Brother, gracias por ser mi hermano mayor y comportarte como tal, en muchos momentos cuidaste de mí y eso es de gran valor para mí.*

*Jordi, gracias por mostrarme el camino hacia las oportunidades con tu ejemplo y apoyo hoy más que nunca me siento orgulloso de que seas mi hermano.*

*Jannet, gracias por la amistad y confianza que me has brindado.*

*Olivia Murillo Espinoza*

*Oly, gracias por creer en mí, te amo porque te admiro y deseo que ambos seamos siempre mejores personas, esa es mi meta a tu lado.*

*A MIS AMIGOS Y PRIMOS, A MIS TIOS YA TODA MI FAMILIA, GRACIAS POR SU GRAN  
COMPañIA Y APOYO.*

*A Edgar Casal y a Sergio Meza, gracias por su apoyo y ayudarme a cumplir este tema.*

*AGRADECIMIENTO ESPECIAL AL ING. JUAN MARCOS CASTELLANOS SANTOS:*

*Gracias por permitirnos ser mejores personas, para mí quien ayuda a una persona a buscar la superación personal es simplemente: Una gran persona!! Muchas gracias Castellanos.*

*Junio 2009*

## INDICE

	<u>TEMA</u>	<u>PÁGINA</u>
	Introducción	1
<b>Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración</b>		
I.1	Introducción	5
I.2	Ciclo de Carnot	9
I.2.1	Expansión isoterma	12
I.2.2	Expansión adiabática	13
I.2.3	Compresión isoterma	14
I.2.4	Compresión adiabática	15
I.2.5	Criterio de signos termodinámico	16
I.3	Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor	17
I.4	Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor	17
I.4.1	Ciclo real de refrigeración	17
I.4.2	Compresión simple	19
I.4.3	Compresión doble directa	20
I.5	Sistema de refrigeración en cascada	20
I.6	Refrigeración por absorción	23
I.6.1	Fundamentos físicos	24
I.6.2	Ciclo de compresión mecánica vs otros procesos	24

**Capítulo II: Fluidos refrigerantes**

II.1	Introducción y definición de los fluidos refrigerantes	28
II.1.1	Definición	28
II.1.2	Historia de los refrigerantes	30
II.1.3	Hechos históricos sobresalientes	37
II.2	Refrigerantes puros y mezclas	40
II.2.1	Refrigerantes puros	41
II.2.2	Fluidos frigoríficos	41
II.2.3	Mezclas zeotrópicas	42
II.2.4	Mezclas azeotrópicas	44
II.3	Características y propiedades de los refrigerantes	46
II.3.1	Características de los refrigerantes	46
II.3.2	Propiedades de los refrigerantes	48
II.4	Clasificación y seguridad de los refrigerantes (CFC, HCFC, HFC)	49
II.4.1	Clasificación según la Norma Oficial	49
II.4.2	Clasificación de acuerdo a la seguridad que ofrecen	50

**Capítulo III: Tecnología solar**

III.1	Introducción a la energía solar	54
III.1.1	Qué es la energía solar	57
III.1.2	Historia de las aplicaciones de la energía solar	58
III.1.3	Características	59
III.1.4	Ventajas de la energía solar	60
III.2	La constante solar	61

---

III.2.1	La radiación normal extraterrestre	63
III.2.2	Distribución espectral	64
III.2.3	Variación del flujo de energía con la distancia	65
III.3	Radiación solar	67
III.3.1	Conversión de hora civil a hora solar	70
III.3.2	Estimación de radiación en un día despejado	73
III.3.3	Medición de la radiación solar	74
III.4	Colectores de energía solar	77
III.4.1	Introducción y descripción de los colectores solares planos	77
III.4.1.1	Introducción a los colectores solares planos	77
III.4.1.2	Descripción de los colectores solares planos	78
III.4.2	Tipos de colectores	79
III.4.2.1	Colectores solares sin concentración	79
III.4.2.2	Colectores solares de concentración	81
III.4.3	Historia, funcionamiento y tipos de colectores fotovoltaicos	81
III.4.3.1	Historia de los colectores fotovoltaicos	81
III.4.3.2	Funcionamiento de colectores fotovoltaicos	82
III.4.3.3	Clasificación de colectores fotovoltaicos en función de sus materiales	84

#### **Capítulo IV: Refrigeración por absorción**

IV.1	Introducción	87
IV.2	Frío por absorción	88
IV.3	Máquinas de refrigeración por absorción	90

---

IV.3.1	Máquinas de absorción	90
IV.3.2	Máquinas desecantes	92
IV.4	Ciclo de absorción simple	92
IV.4.1	Fluidos refrigerantes	93
IV.4.1.1	Tecnología BrLi	93
IV.4.1.2	Tecnología del Amoniaco/Agua	94
IV.4.2	Refrigeración por absorción vs refrigeración por compresión	97
IV.5	Ciclos de refrigeración por absorción	100
IV.5.1	Ciclos continuos	100
IV.5.2	Ciclos intermitentes	102
IV.5.3	Sustancias utilizadas	104
IV.5.4	Rendimiento de los sistemas de refrigeración por absorción	105

**Capítulo V: Refrigeración solar**

V.1	Introducción	107
V.2	La energía solar	109
V.3	Aprovechamiento de la energía solar	109
V.3.1	Calentamiento directo de locales por el sol	111
V.3.2	Acumulación de calor solar	111
V.3.3	Generación de electricidad	112
V.4	Refrigeración con energía solar	114
V.4.1	Sistemas activos de refrigeración fotovoltaicos	115
V.4.1.1	Sistemas fotovoltaicos	115
V.4.1.2	Refrigeración fotovoltaica	116



# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Índice

---

V.4.1.3	Refrigerador fotovoltaico Sun Danzer	116
V.4.2	Absorción, adsorción y efecto compresión	118
V.5	Sistemas de refrigeración solar	120
V.5.1	Refrigeración solar con máquinas enfriadoras térmicas: absorción y adsorción	122
V.5.2	Refrigeración solar mediante desecación y refrigeración evaporativa	124
V.6	Refrigeración solar en México	125
V.7	Una visión al futuro	127
	Conclusión	130
	Glosario	133
	Bibliografía	136

## **Introducción**

A través de la historia, se ha evolucionado en todos los aspectos de la vida social; todo, en beneficio del ser humano, en busca de comodidad y de seguridad.

La generación de la electricidad es uno de los temas preocupantes de la sociedad actual. El desgaste que ha tenido la naturaleza a favor de los seres humanos ha sido extremadamente grande, y los recursos ya pasan factura.

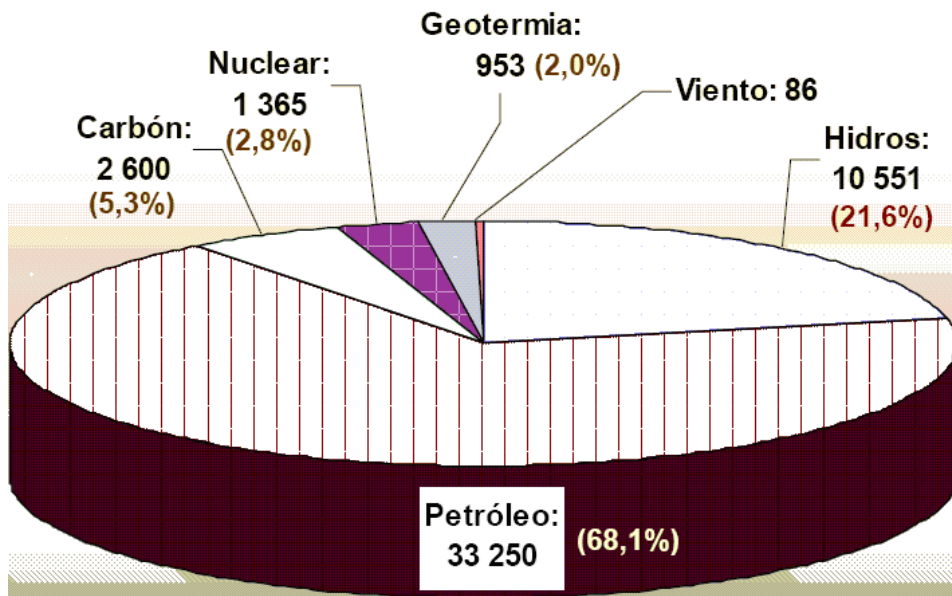
Actualmente, se sabe que la electricidad puede generarse de muy diversas maneras, y hay varias fuentes que se utilizan para tal fin; tal es el caso de:

- ⇒ El movimiento del agua que corre y cae.
- ⇒ El calor para producir calor o mover turbinas
- ⇒ El calor interior de la Tierra, conocido como geotermia.
- ⇒ La energía nuclear (del átomo)
- ⇒ Energías renovables como:
  - ⇒ Solar
  - ⇒ Biomasa (leña, carbón, basura, rastrojos del campo, etcétera)
  - ⇒ De los vientos (eólica)

La energía solar es la que nos atañe en este momento, y es el motivo del presente trabajo de tesis. Sin embargo, nos ha parecido importante el hacer notar que la energía puede

obtenerse de cualquier lado y puede ser aprovechable en pro del beneficio de la sociedad y sin afectar el medio ambiente ni los recursos naturales.

Como ejemplo particular, podemos decir que en la República mexicana existen diversas maneras de generar energía y plantas para generar la electricidad requerida; haciendo una estadística en general, se puede realizar una gráfica como la siguiente:



Como se puede observar en la gráfica, la energía que se obtiene o que se puede obtener del sol, ni siquiera se encuentra en las estadísticas en nuestro país, lo cual es muy preocupante y determinaría un desperdicio muy grande su no aprovechamiento.

De aquí, cabe mencionar que los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural, son recursos finitos e inevitablemente habrán de agotarse por el uso; es la razón por la que reciben el nombre de recursos no renovables.

Sin embargo, para ayudar a resolver esta problemática, existen energías renovables, que se definen como aquellas formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida del ser humano en la Tierra, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable. Dentro de este tipo de energía se pueden encontrar:

- ⇒ Energía solar (del sol)
- ⇒ Energía eólica (del viento)
- ⇒ Energía minihidráulica (ríos y pequeñas caídas de agua)
- ⇒ Energía de la biomasa (materia orgánica)
- ⇒ Energía geotérmica (el calor de las capas internas de la Tierra)
- ⇒ Energía oceánica (del océano)
- ⇒ Etcétera.

Las energías renovables ofrecen la oportunidad obtener energía útil para diversas aplicaciones; su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales (afecta al medio ambiente, pero en menor medida que los combustibles) y poseen el potencial necesario para satisfacer todos los requerimientos y necesidades de energía de la sociedad actual y en el futuro.

Por otro lado, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional.

En este trabajo, se ha buscado el aprovechamiento de la energía solar en particular, y específicamente en el tema de refrigeración, puesto que su uso y aprovechamiento corresponde a un tema muy extenso.

En este sentido, se puede agregar lo siguiente:

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Introducción

---

Además de la luz y el calor, el sol nos ofrece suficiente energía para calentar agua y para generar electricidad.

Actualmente, el uso de la energía solar para la alimentación de casas e inmuebles se ha vuelto muy popular; y es que se trata de una energía inagotable y que siempre está al alcance de la mano.

Por supuesto, hay que saber aprovecharla y por ello, también se han dispuesto elementos y dispositivos necesarios para su utilización.

Finalmente, esperamos que el presente trabajo pueda servir de inspiración para aquellas personas que buscan el mejor aprovechamiento de la energía.

# **CAPITULO I: PRINCIPIOS TEORICOS** **SOBRE LA REFRIGERACION.**

## **I.1. Introducción.**

Uno de los métodos más antiguos de refrigeración y que en algunos lugares se sigue utilizando, es el que se basa en la fusión de hielo o nieve, que a la presión de 1 atm, tiene lugar una temperatura de 0°C.

El hielo o nieve se colocan en el espacio o sobre los objetos que se quieren refrigerar o enfriar y que tiene una temperatura superior a los 0°C.

Según la segunda ley de la termodinámica, el calor fluirá espontáneamente de la región de mayor temperatura (espacio u objetos a refrigerar) hacia la región de menor temperatura (hielo o nieve), de manera que el espacio u objetos son enfriados.

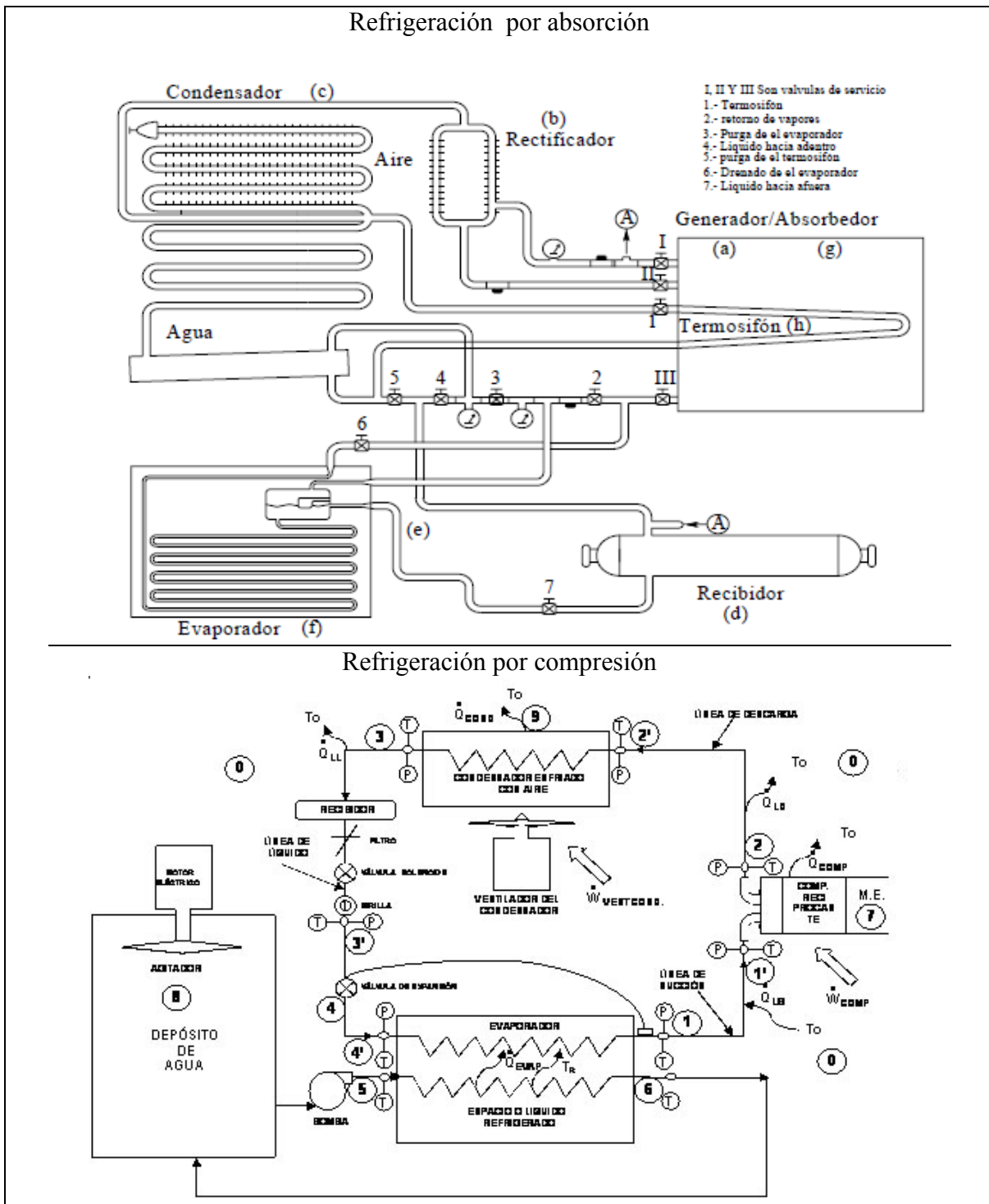
Esto ocurre también debido a que el hielo o nieve en esas condiciones de temperatura y presión ambiente, debe pasar al estado líquido, y para hacer ese cambio de fase (sólido a líquido), se requiere de una determinada cantidad de calor (calor de fusión=80cal/gr) que es suministrada por los alrededores.

Otras prácticas muy comunes para obtener refrigeración eran también mediante el uso del bióxido de carbono (hielo seco) o agua fría, operando bajo principios semejantes a los mencionados para el hielo o la nieve.

Los sistemas de refrigeración que actualmente se utilizan son el sistema de refrigeración por compresión y el sistema de refrigeración por absorción.

“UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

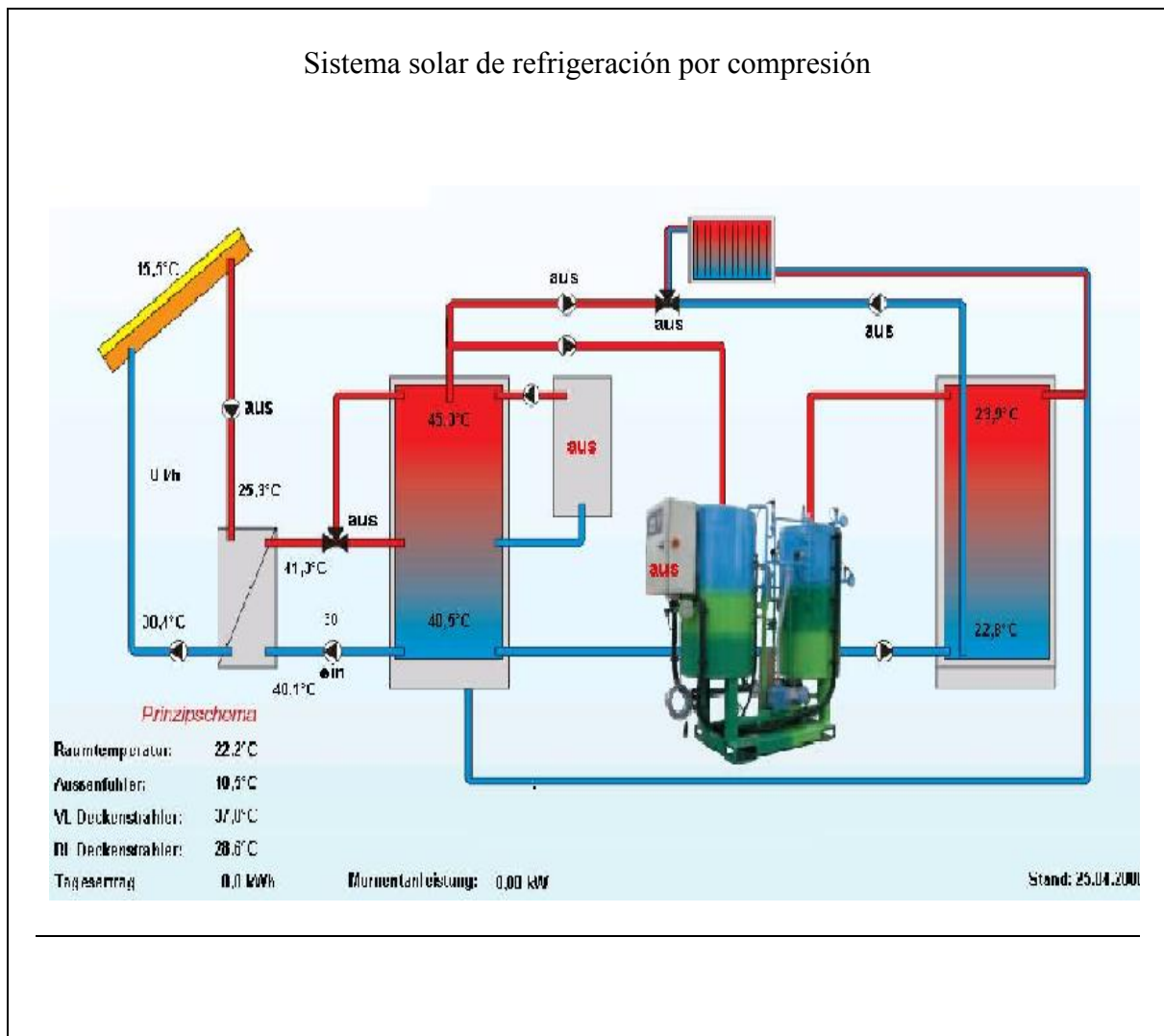


# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

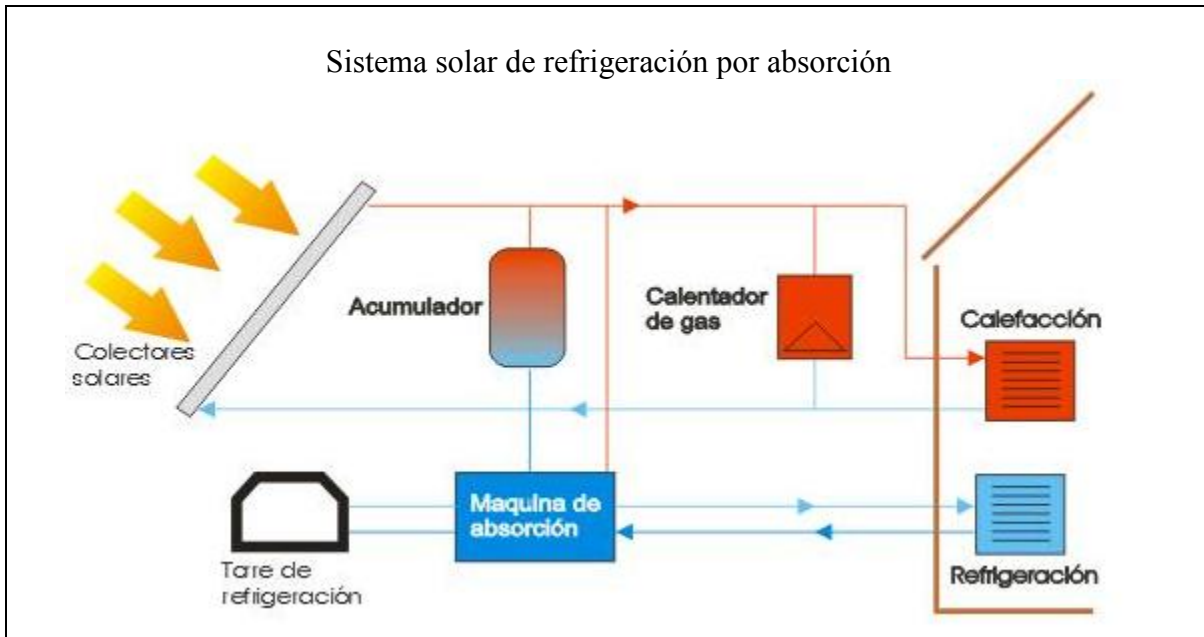
## Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

Estos sistemas se basan en la evaporación o gasificación de un líquido a baja presión. Al igual que un sólido absorbe calor para pasar al estado líquido, un líquido también debe absorber calor para vaporizarse o pasar al estado gaseoso.

Tanto el sistema de refrigeración por compresión como el de absorción pueden ser adoptados para que funcionen con energía solar. El primero mediante la conversión de la energía solar en energía mecánica o eléctrica para hacer funcionar el compresor de un sistema convencional, y el segundo mediante la utilización directa de la energía solar como fuente de energía térmica. Este último por no implicar conversiones de un tipo de energía en otra, resulta más económico y eficiente y es el sistema que abordaremos en el capítulo presente.







Debido a la intermitencia propia de la radiación solar, lo más sensato es pensar en sistemas de refrigeración intermitentes, aunque también se pueden desarrollar sistemas que operen continuamente, pero que necesitan de un sistema de almacenamiento y de una fuente auxiliar de energía para que puedan seguir operando en las horas que no hay radiación solar (como la noche y los periodos con nublados intensos).

El decidirse por algún tipo de sistema también tiene que ver con la aplicación que se le vaya a dar. Si el sistema se necesita para el acondicionamiento calorífico de viviendas o edificios generalmente se utilizan sistemas continuos que utilizan una mezcla de bromuro de litio agua ( $\text{BrLi-H}_2\text{O}$ ), pero si lo que se requiere es conservar alimentos o cualquier tipo de producto perecedero, un sistema intermitente podría dar buenos resultados. Estos, generalmente utilizan mezcla de amoníaco-agua ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ) y logran temperaturas lo bastante bajas como para producir hielo.

A lo largo de los últimos dos siglos, el desarrollo humano, con sus industrias, comercios y sociedades consumidoras, ha estado basado en la utilización de recursos energéticos no renovables. Sin embargo, con la satisfacción de necesidades básicas se han creado nuevas inquietudes para el mejoramiento de la calidad de vida de la especie humana, que en la actualidad puede sobrevivir con comodidad. Este crecimiento de las necesidades por satisfacer ha traído consigo que en los últimos años el dispendio de los recursos energéticos se haya vuelto indiscriminado.

Existen muchas alternativas para la satisfacción de las demandas energéticas actuales. La energía nuclear, la energía geotérmica y la energía gravitacional contenida en las mareas son algunos ejemplos de fuentes no convencionales de producción energética que varían en cuanto a su factibilidad y costos iniciales de capital requeridos para su implementación. Otra alternativa es el empleo de la energía solar en todas sus formas.

La energía solar comprende a todos los tipos de manifestaciones derivadas en forma directa o indirecta de la continua acción de transformación materia energía que se lleva a cabo por medio del proceso de fusión nuclear que ocurre en el sol. Entre estos se tiene:

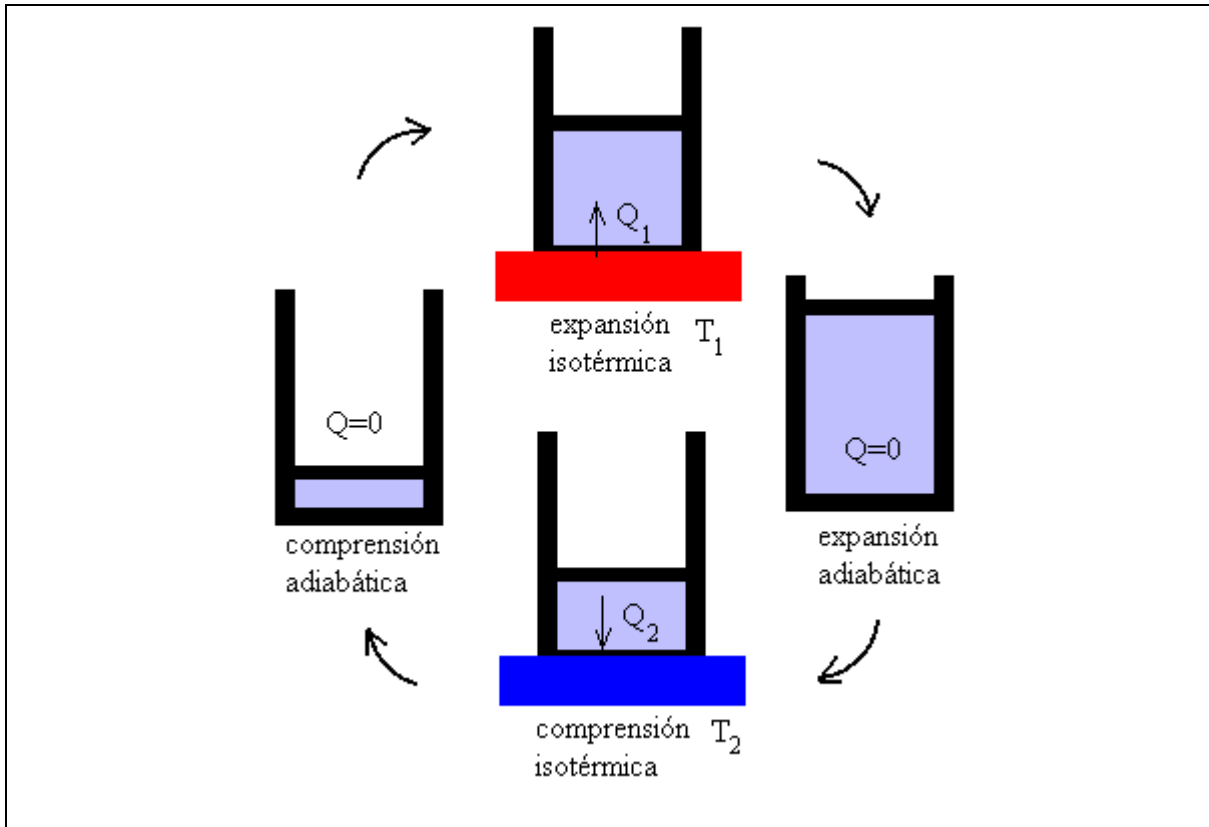
- ⇒ La energía de los vientos, producida por el calentamiento diferenciado de las diversas capas de aire de la atmósfera.
- ⇒ La energía almacenada en los seres vivos, aprovechable en una forma conocida como biomasa.
- ⇒ La energía fotovoltaica, susceptible de ser transformada (mediante el uso del efecto fotoeléctrico) en energía eléctrica.
- ⇒ El calor solar, que puede ser aprovechable como una fuente térmica de alta calidad, y otras.

Las aplicaciones de la energía solar en la solución de la problemática energética son variadas. Con ella se pueden solucionar los conflictos de producción de energía eléctrica (con todas las ventajas, que este tipo de producción significa para el transporte, las comunicaciones, etcétera), los problemas asociados con la refrigeración y el acondicionamiento de aire para edificios y otras aplicaciones, que en muchos casos contribuyen a mejorar la calidad de vida de las personas involucradas.

Una de las aplicaciones de la energía solar térmica más especializadas es la relacionada con el aprovechamiento de las propiedades conductoras de energía térmica de los denominados tubos de calor (Leavit, 2000) y su aplicación en sistemas de refrigeración.

## **I.2. Ciclo de Carnot.**

El ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal reversible entre dos fuentes de temperatura, en el cual el rendimiento es máximo. Fue estudiado por Sadi Carnot en su trabajo “*Reflections sur la puissance motrice de feu et sur les machines propres à développer cette puissance*”, de 1824.



Dentro de este contexto, se dice que una máquina térmica que realiza este ciclo, se denomina “máquina de Carnot”. Ésta trabaja absorbiendo una gran cantidad de calor  $Q_1$  de la fuente de alta temperatura y cede un calor  $Q_2$  a la de baja temperatura; produciendo así, un trabajo en el exterior. El rendimiento viene definido, como en todo el ciclo, por la ecuación:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

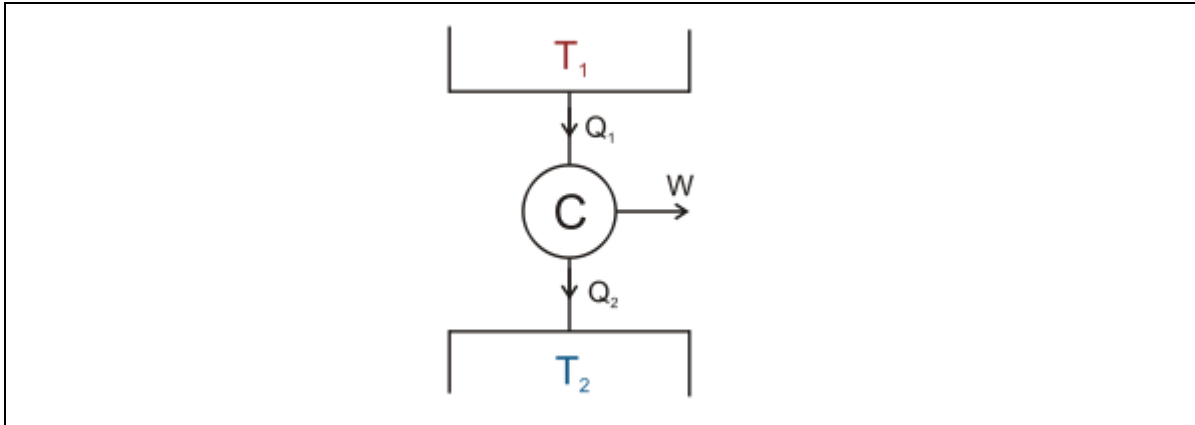
En este caso y, como se verá más adelante, el rendimiento es mayor que cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse. Entonces la máquina absorbe calor de la fuente fría y cede calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina.

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

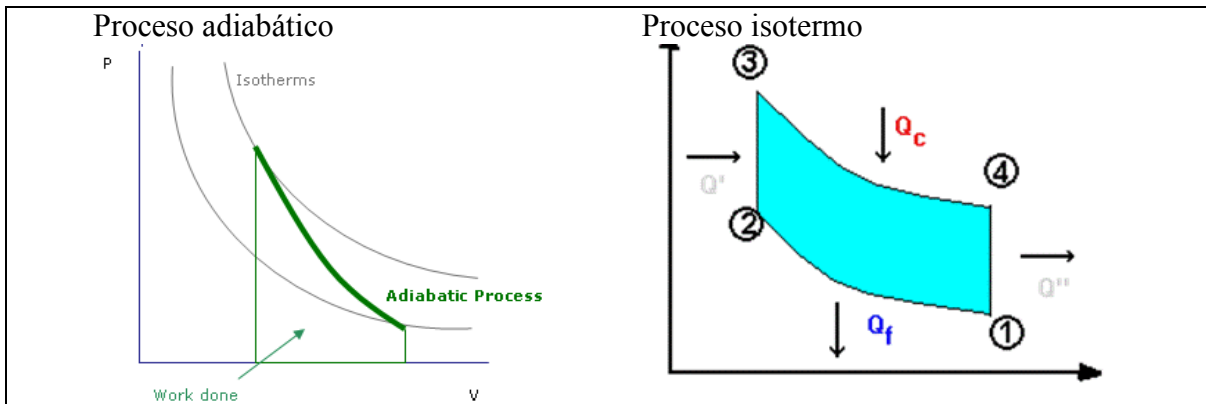
## Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría se denomina máquina frigorífica, y si es aportar calor a la fuente caliente bomba de calor.



El ciclo de Carnot consta de cuatro etapas:

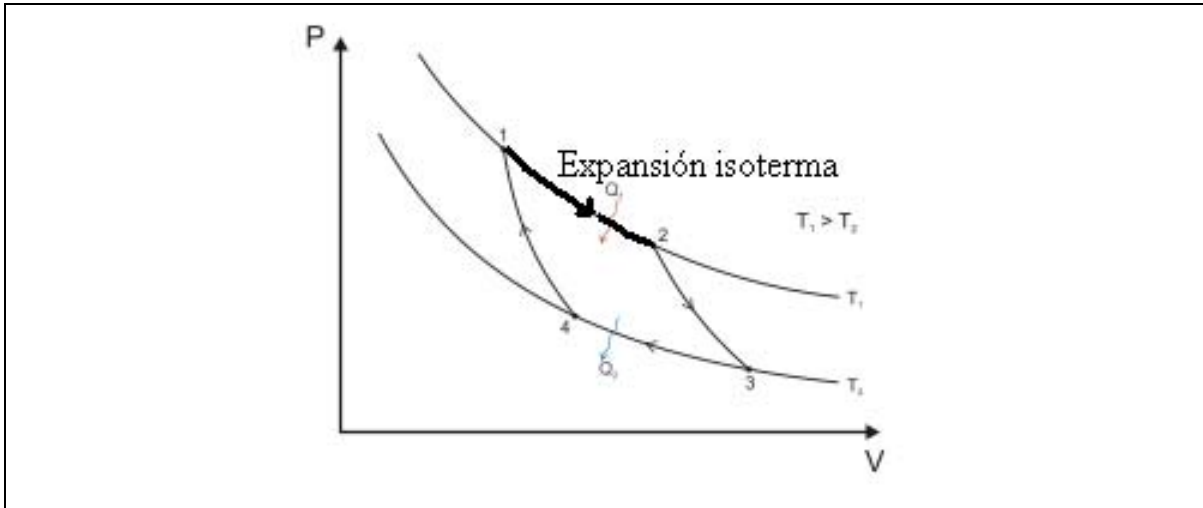
- ⇒ Dos procesos isotermos o a temperatura constante
- ⇒ Dos procesos adiabáticos o aislados térmicamente



De aquí parte el hecho de que tanto los procesos adiabáticos como los isotermos, pueden expandirse o comprimirse.

Las aplicaciones del primer principio de la termodinámica están escritas acorde con el Criterio de signos termodinámico.

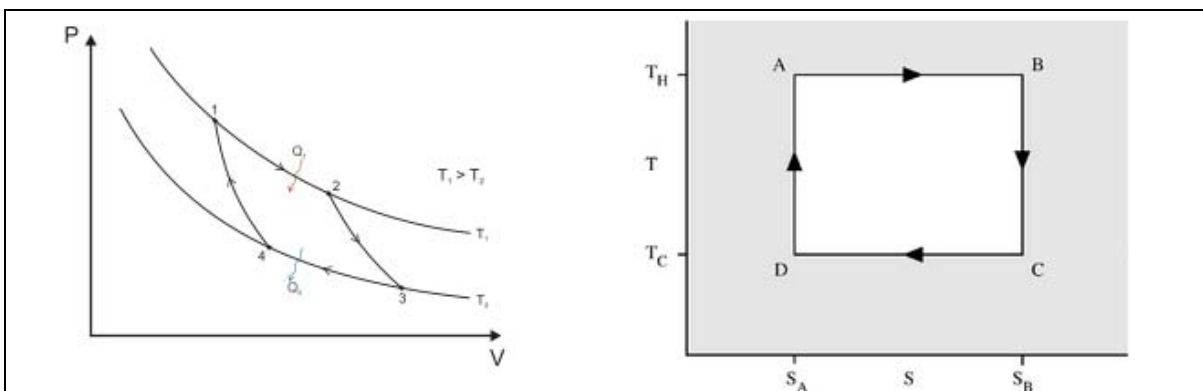
**I.2.1 Expansión isoterma**



En la expansión isoterma, se parte de una situación en que el gas se encuentra al mínimo volumen del ciclo y a temperatura  $T_1$  de la fuente caliente. En este estado se transfiere calor al cilindro desde la fuente de temperatura  $T_1$ , haciendo que el gas se expanda. Al expandirse, el gas tiende a enfriarse, pero absorbe calor de  $T_1$  y mantiene su temperatura constante.

Al tratarse de un gas ideal, y al no cambiar la temperatura, tampoco lo hace su energía interna; y despreciando los cambios en la energía potencial y la energía cinética, se ve que todo calor transferido es convertido en un trabajo (esto, atendiendo a la primera ley de la termodinámica), de la forma:

$$Q_{12} > 0 ; U_{12} = 0 \implies 0 = U_{12} = Q_{12} - W_{12} \implies W_{12} = Q_{12} \implies W_{12} > 0$$



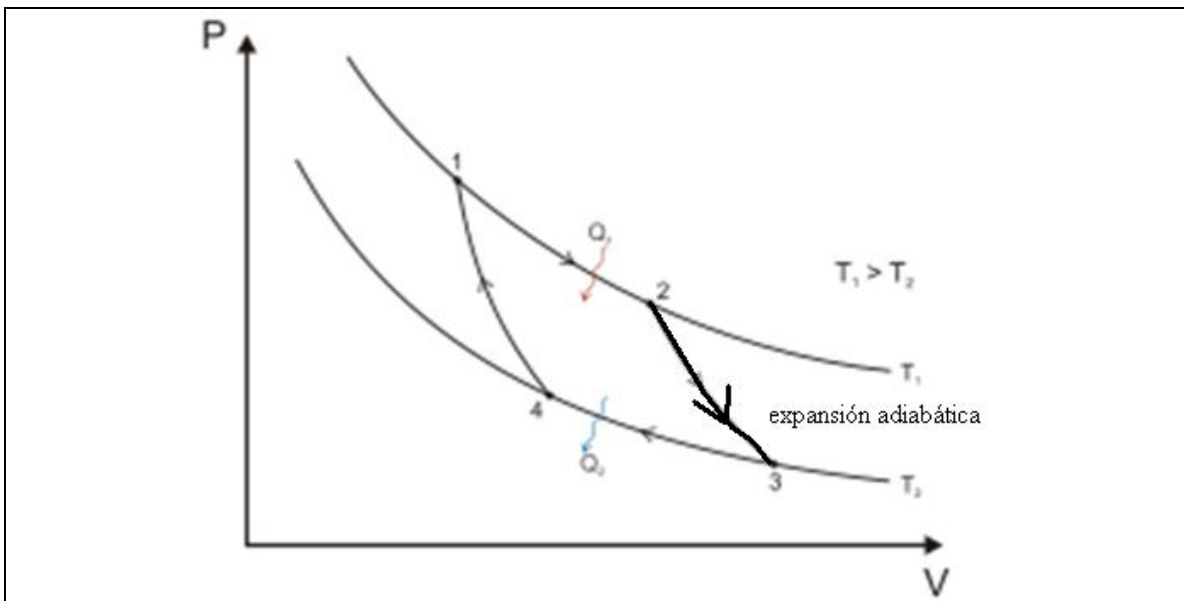
Desde el punto de vista de la entropía, ésta aumenta en este proceso: por definición, una variación de entropía viene dada por el cociente entre el calor transferido y la temperatura de la fuente en un proceso reversible.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev}$$

Como el proceso es efectivamente reversible, la entropía aumentará

$$S_{12} = \frac{Q_{12}}{T_1} > 0$$

### I.2.2 Expansión adiabática



La expansión isoterma termina en un punto tal que el resto de la expansión pueda realizarse sin intercambio de calor. A partir de aquí el sistema se aísla térmicamente, con lo que no hay transferencia de calor con el exterior.

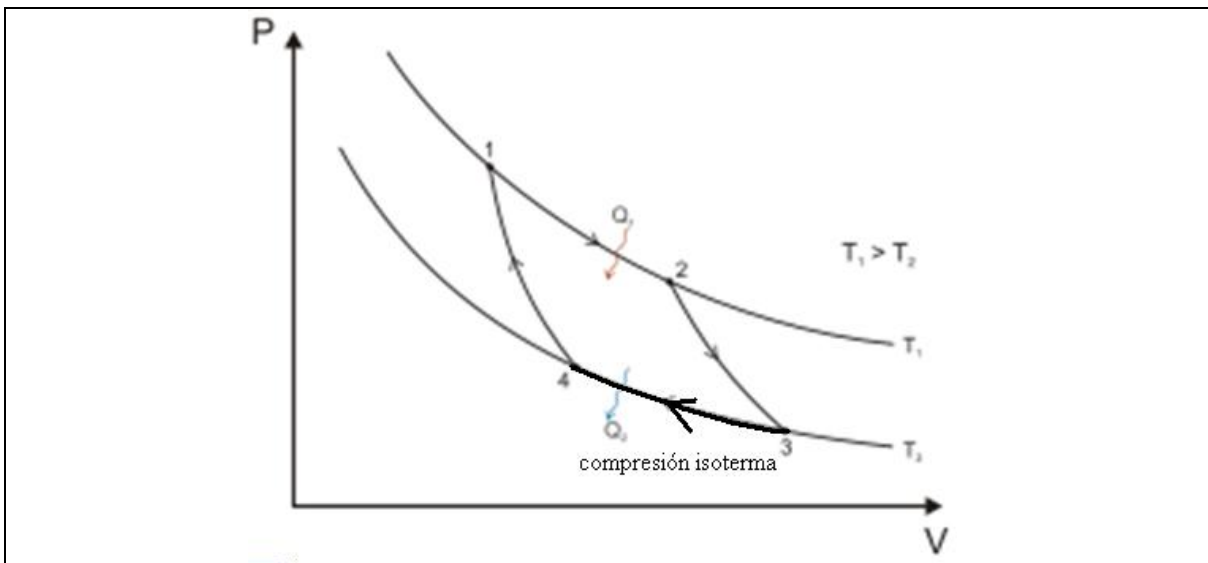
Esta expansión adiabática hace que el gas se enfríe hasta alcanzar exactamente la temperatura  $T_2$  en el momento en que el gas alcanza su volumen máximo. Al enfriarse disminuye su energía interna, con lo que utilizando un razonamiento análogo al anterior proceso:

$$Q_{23} = 0 ; U_{23} < 0 \implies U_{23} = -W_{23} \implies W_{23} > 0$$

Esta vez, al no haber transferencia de calor, la entropía se mantiene constante:

$$S_{23} = 0$$

### I.2.3 Compresión isoterma



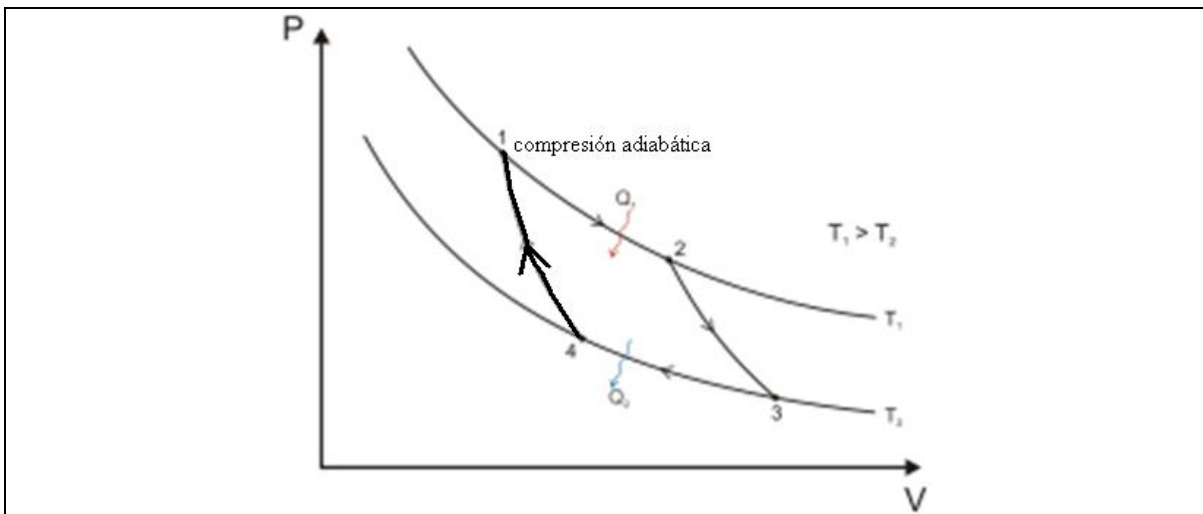
La compresión isoterma se pone en contacto con el sistema la fuente de calor de temperatura  $T_2$  y el gas comienza a comprimirse, pero no aumenta su temperatura porque va cediendo calor a la fuente fría. Al no cambiar la temperatura tampoco lo hace la energía interna, y la cesión de calor implica que hay que hacer un trabajo sobre el sistema:

$$Q_{34} < 0 ; U_{34} = 0 \implies 0 = U_{34} = Q_{34} - W_{34} \implies W_{34} = Q_{34} \implies W_{34} < 0$$

Al ser el calor negativo, la entropía disminuye:

$$S_{34} = \frac{Q_{34}}{T_2} < 0$$

### I.2.4 Compresión adiabática



En la compresión adiabática, aislado térmicamente, el sistema evoluciona comprimiéndose y aumentando su temperatura hasta el estado inicial. La energía interna aumenta y el calor es nulo, habiendo que comunicar un trabajo al sistema:

$$Q_{41} = 0 ; U_{41} > 0 \implies U_{41} = -W_{41} \implies W_{41} < 0$$

Al ser un proceso adiabático, no hay transferencia de calor, por lo tanto la entropía no varía:

$$S_{41} = 0$$



### **I.2.5 Criterio de signos termodinámico**

El criterio de signos que se suele utilizar en termodinámica para evaluar los intercambios entre un sistema y el entorno de energía en forma de calor y trabajo es el siguiente según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry):

- ⇒ Positivo para el trabajo cedido por el sistema y el calor entregado al sistema.
- ⇒ Negativo para el trabajo entregado al sistema y el calor cedido por el sistema.

De este modo el trabajo se define como una transferencia de energía que puede expresarse según la siguiente ecuación en un proceso reversible:

$$W_{AB} = \int_A^B P dV$$

Por ejemplo, en una expansión isobárica, el volumen final  $V_B$  es mayor que el volumen inicial  $V_A$ , luego

$$\int_A^B P dV > 0$$

y el sistema realiza un trabajo sobre su entorno, cediendo trabajo para pasar el estado inicial  $A$  al estado final  $B$ , luego

$$W_{AB} > 0$$

El primer principio de la termodinámica relaciona la energía interna de un sistema, y el calor y el trabajo que se intercambian con él mediante la siguiente expresión:

$$\Delta U = Q - W$$

En otras disciplinas, sin embargo, se utiliza el criterio contrario: la energía cedida (en forma de calor y de trabajo) por el sistema es positiva. Se suele emplear al hablar de sistemas cuyo objetivo es generar esa energía para ser aprovechado por otros dispositivos o para otras funciones.

### **I.3. Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.**

Un sistema de refrigeración por compresión de vapor emplea freón 12 con un flujo másico de 6 kg/min. El refrigerante entra al compresor como vapor saturado a 1.5 bar y sale a 7 bar's.

El rendimiento isoentrópico del compresor es de 70%. El fluido abandona el condensador como líquido saturado. La temperatura de la cámara refrigerada es de -10°C y la del ambiente 22°C. No hay pérdidas de calor ni de presión en el circuito refrigerante.

A través de un diagrama T-s, se puede determinar:

- ⇒ El máximo coeficiente de operación de un equipo frigorífico que opere entre dos depósitos
- ⇒ El coeficiente de operación real de este ciclo
- ⇒ La potencia del compresor en kW
- ⇒ La capacidad de refrigeración, en kW
- ⇒ Si el refrigerante se sobrecalienta 3°C en el evaporador, cómo afecta esto la potencia de compresión, la capacidad de refrigeración y el COP.
- ⇒ Si el refrigerante adicionalmente se subenfía 3°C en el condensador, cómo afecta esto la potencia de compresión, la capacidad de refrigeración y el COP.

### **I.4. Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.**

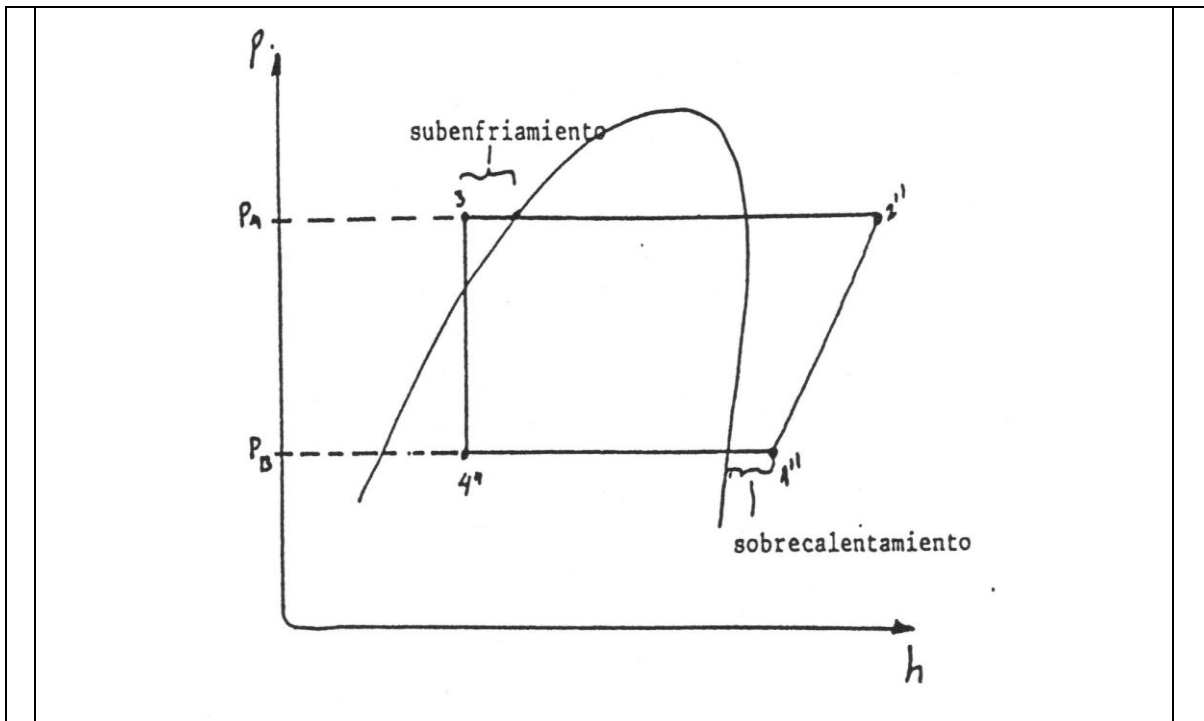
Por supuesto, existe un proceso ideal que se debería de cumplir al pie de la letra. Lo cierto es que eso no sucede y que los sistemas reales trabajan bajo funcionamientos muy diversos y, aunque tratan de acercarse al modelo ideal, esto no se cumple totalmente.

#### **I.4.I Ciclo real de refrigeración.**

En la práctica deben realizarse ciertos cambios, en forma inevitable o intencionada respecto al ciclo estándar, entre los cuales se encuentran:

- ⇒ Sub-enfriamiento del líquido en el condensador.
- ⇒ Sobre calentamiento del vapor en el evaporador.
- ⇒ Compresión no isoentrópica.
- ⇒ Caída de presión por fricción en evaporador y condensador.

Exceptuando la última causa, el ciclo real queda como:



La necesidad de disponer en la industria de una serie de fuentes frías, para distintas operaciones, a niveles térmicos diferentes, se puede conseguir fácilmente mediante ciclos de compresión independientes, uno para cada necesidad; en ciertas aplicaciones resulta interesante centralizar toda la instalación en un solo sistema, capaz de servir a partir de una única instalación frigorífica, todos los niveles de temperatura requeridos; de entre ellos destacamos los siguientes:

- ⇒ Compresión simple
- ⇒ Compresión doble directa

### **I.4.2 Compresión simple.**

Mediante un sistema de compresión simple, resulta totalmente factible el suministrar un fluido frigorígeno a distintas temperaturas. Para ello, en principio, basta con disponer dos válvulas de expansión en paralelo, hasta las presiones requeridas.

Se observa que existe una reexpansión isentálpica de los vapores de salida del evaporador de alta temperatura provocando un recalentamiento de los mismos, (5-7), lo cual es necesario para igualar su presión a la de los vapores que provienen del evaporador de baja temperatura y poder efectuar la mezcla de ambas corrientes antes de introducirlas en la primera etapa de la compresión, estado 1.

Las necesidades frigoríficas de los distintos evaporadores  $q_{1a}$  y  $q_{1b}$ , se pueden determinar a partir de los caudales máscicos de fluido frigorígeno que circulan por cada uno de ellos  $m_a$  y  $m_b$  y viceversa, en la forma:

$$q_{2a} = m_a (i_5 - i_4) ; q_{2b} = m_b (i_8 - i_6)$$

Tomando en cuenta un sistema de compresión simple y expansión múltiple, se puede decir lo siguiente: Haciendo un balance de masa y energía en los estados 7 y 8, se puede conocer la situación del estado 1, de entrada al compresor de baja temperatura:

$$m_c = m_a + m_b \quad m_c i_1 = m_a i_7 + m_b i_8$$

El trabajo de compresión es:

$$TC = m_c (i_2 - i_1)$$

El calor cedido en el condensador es:

$$q_1 = m_c (i_2 - i_3)$$

### **I.4.3 Compresión doble directa.**

A partir de una instalación de compresión en dos etapas es posible trabajar a varias temperaturas de evaporación por medio de una expansión múltiple, de forma similar a lo visto anteriormente. Si se conocen las temperaturas de compresión y condensación y las necesidades frigoríficas correspondientes, se pueden dar los siguientes casos:

- ⇒ INYECCIÓN TOTAL.- Utiliza un intercambiador intermedio de tipo abierto, de forma que se hace una expansión previa (5-6) antes de entrar en el mismo; la obtención de dos temperaturas de evaporación se puede conseguir de dos formas:
- a) La presión intermedia es igual a la presión correspondiente al evaporador de alta temperatura.
  - b) La presión intermedia, (calculada por alguno de los métodos desarrollados anteriormente), no coincide con la presión correspondiente al evaporador de alta temperatura.
- ⇒ INYECCIÓN PARCIAL.- En este caso la diferencia estriba en el tipo de intercambiador utilizado, ya que ahora se dispone de uno en el que además del enfriamiento de los vapores, parte del líquido condensado pierde un calor sensible, subenfriándose a costa de la evaporación de una cierta cantidad de líquido a la presión intermedia.

### **I.5. Sistema de refrigeración en cascada.**

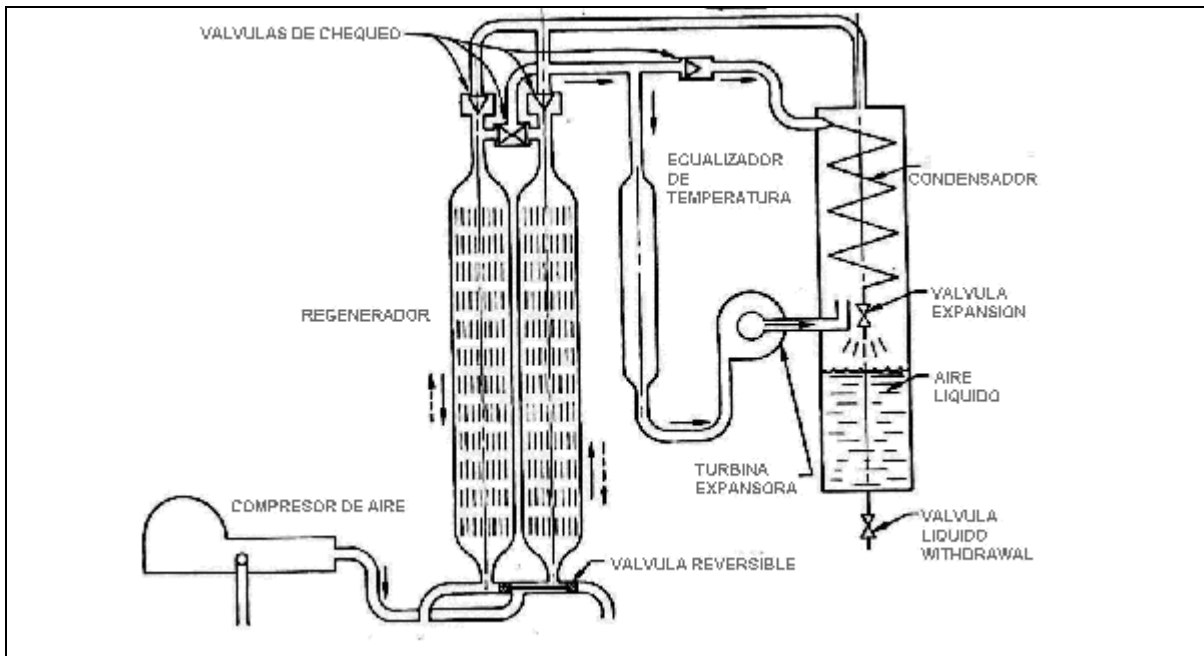
En ciertas aplicaciones son necesarias temperaturas de trabajo extremadamente bajas, por debajo de  $-30^{\circ}\text{C}$  por lo que la relación de presiones para una sola etapa de compresión tiene que ser elevada; si se elige un fluido frigorígeno cuyos valores de la presión en el evaporador sean moderados, resulta que las presiones en el condensador son elevadas y viceversa.

A bajas temperaturas, las presiones correspondientes son muy bajas, (inferiores a la presión atmosférica), por lo que en las zonas de producción de frío existe una fuerte tendencia a la entrada de aire húmedo a los evaporadores, lo que implica un porcentaje de humedad que puede solidificar dando lugar a trastornos en el funcionamiento.

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

Además, cuanto menor sea la temperatura, el volumen específico del vapor a la entrada del compresor será mayor, por lo que para una misma masa de fluido frigorígeno a desplazar, a menor temperatura requerida mayor deberá ser el volumen disponible del compresor.



Si el fluido tiene unas características adecuadas para el evaporador y resulta que las condiciones del condensador están cerca del punto crítico, cuando el fluido se expansione, el título al final de la expansión será muy grande, lo que disminuye el COP de la instalación, al tiempo que exige potencias en el compresor relativamente altas, de forma que hay que recurrir a compresiones escalonadas para paliar el problema.

Por eso, para la producción de frío a bajas temperaturas, se han desarrollado sistemas de compresión indirecta, en los que se utilizan fluidos frigorígenos especiales, que solventan las dificultades citadas y que por otro lado no son adecuados para trabajar en la zona de condensación normal, ya que por un lado dan lugar a altas presiones, con el consiguiente problema de posibles fugas al exterior y por otro presentan el inconveniente de poseer bajas temperaturas críticas.

Los condicionantes anteriores se resuelven con la refrigeración en cascada, mediante una adecuada elección de las presiones intermedias que evite los problemas de estanqueidad y origine al mismo tiempo relaciones de compresión razonables.

La producción de frío a bajas temperaturas se consigue mediante sistemas de compresión simples, que utilizan fluidos frigorígenos especiales; para el caso de dos etapas de compresión, los vapores resultantes se comprimen hasta una cierta presión mediante un compresor de (BP) y posteriormente se condensan en un intercambiador intermedio, mediante la cesión de calor al evaporador de un segundo circuito de compresión simple por el que circula un fluido frigorígeno distinto; la condensación del fluido frigorígeno de baja temperatura tiene por objeto la vaporización del de alta, tal, que pueden ser condensados con ayuda de un agente exterior; las válvulas V1 y V2 completan ambos ciclos.

Si se superponen en un mismo diagrama (p-i) ambos sistemas, se obtiene el ciclo conjunto de la instalación, se observa que las temperaturas de condensación de la etapa de baja temperatura y de evaporación de la etapa de alta temperatura no son iguales, existiendo un salto térmico DT para que tenga lugar el intercambio térmico entre los fluidos; cuanto mayor sea esta diferencia de temperaturas, la superficie de intercambio térmico será menor.

Para determinar el calor transferido en el intercambiador intermedio, se supondrá no existen pérdidas térmicas al exterior; haciendo un balance térmico en el intercambiador, la masa de fluido ma de la etapa de alta temperatura se obtiene en la forma:

$$m_A (i_1' - i_4') = m_B (i_2 - i_3) \quad \text{P} \quad m_A m_B = i_2 - i_3 \quad i_1' - i_4'$$

La eficacia de la instalación es:

$$\text{COP} = \frac{m_B (i_1 - i_4)}{m_B (i_2 - i_1) h_{\text{compB}} + m_A (i_2' - i_1') h_{\text{compA}}}$$

$$= \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1 h_{\text{compB}} + i_2 - i_3 \quad i_1' - i_4' \quad i_2' - i_1' h_{\text{compA}}}$$

Los principales inconvenientes que se presentan en estas instalaciones son:

- ⇒ La transformación de calor en el intercambiador intermedio (evaporador alta-condensador baja) siempre da lugar a pérdidas por no ser un equipo de características ideales.
- ⇒ Si la instalación se mantiene parada durante un largo período, el igualar la temperatura del circuito de baja a la temperatura ambiente, da lugar a fuertes presiones en dicho circuito, por lo que se hace necesario disponer de un sistema de alivio, consistente en un recipiente de volumen apropiado, (bulbo), con vistas a impedir pérdidas de fluido frigorígeno.





### **I.6.1 Fundamentos físicos.**

A partir de este principio es posible concebir una máquina en la que se produce una evaporación con la consiguiente absorción de calor, que permite el enfriamiento de un fluido secundario en el intercambiador de calor que actúa como evaporador, para acto seguido recuperar el vapor producido disolviendo una solución salina o incorporándolo a una masa líquida.

El resto de componentes e intercambiadores de calor que configuran una planta frigorífica de Absorción, se utilizan para transportar el vapor absorbido y regenerar el líquido correspondiente para que la evaporación se produzca de una manera continua.

En los ciclos de absorción hablamos siempre de agente absorbente, designando así a la sustancia que absorbe los vapores, y de agente refrigerante, o agente frigorífico, a la sustancia que se evapora y da lugar a una producción frigorífica aprovechable.

Serían absorbentes el agua y la solución de Bromuro de Litio, y refrigerantes el Amoniaco y el agua destilada, en los ciclos de absorción Agua-Amoniaco y Bromuro de Litio-Agua, respectivamente.

Para conseguir una mejor comprensión del funcionamiento de un ciclo de absorción, haremos una comparación entre este y un ciclo de refrigeración por compresión mecánica, de uso más extendido y, por tanto más conocido a todos los niveles técnicos.

### **I.6.2 Ciclo de compresión mecánica vs otros procesos**

En un ciclo de compresión mecánica, los vapores del agente frigorígeno (como debe ser denominado) que se producen en el evaporador de la máquina dando lugar a la producción frigorífica, son aspirados por un compresor que ejerce las funciones de transportar el fluido y de elevar su nivel de entalpía.

El vapor comprimido a alta presión y con un elevado nivel térmico se entrega a un intercambiador de calor, el condensador, para que ceda su energía a otro fluido, que no es utilizable para la producción frigorífica, y cambie de estado, pasando a ser líquido a alta presión y temperatura, y por lo tanto tampoco utilizable para la producción frigorífica.

Este líquido relativamente caliente se fuerza a pasar a través de un dispositivo en el que deja parte de la energía que contiene, por fricción mecánica fundamentalmente, y a partir del cual entra en una zona del circuito frigorífico en la que la presión se mantiene sensiblemente más baja, debido a que el compresor está aspirando de ella, que la presión de saturación que correspondería en el equilibrio a la temperatura a la que se encuentra el agente frigorígeno en estado líquido.

Este desequilibrio entre las presiones y temperaturas de saturación y las reales a las que el refrigerante se encuentra, origina la evaporación parcial del líquido, que toma el calor latente de cambio de estado de la masa del propio líquido, enfriándola hasta la temperatura de saturación que corresponde a la presión a la que se encuentra, punto en el que la evaporación se interrumpe.

El refrigerante en estado líquido a baja temperatura entra en el evaporador, donde se evaporará, cerrando así el ciclo frigorífico.

En la máquina de absorción se produce un proceso similar: El refrigerante, agua o amoníaco, se evapora en el evaporador tomando el calor de cambio de estado del fluido que circula por el interior del haz tubular de este intercambiador.

Los vapores producidos se absorben por el absorbente, agua o solución de bromuro de litio, en un proceso de disolución endotérmico que requiere de refrigeración externa para que la solución se mantenga en condiciones de temperatura correctas y no aumente la presión en la cámara en la que se produce la absorción y que se denomina Absorbedor. En este circuito de refrigeración externa se utilizan normalmente torres de refrigeración de agua de tipo abierto o cerrado.

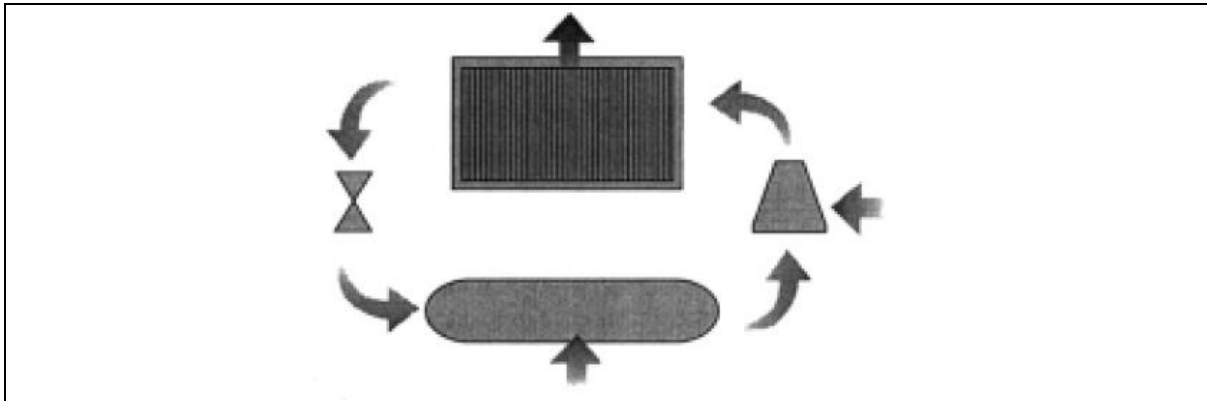
El agua enfriada en la torre se hace circular a través del interior del haz tubular de otro intercambiador que se encuentra situado en el interior de la cámara del absorbedor y sobre el que se rocía el absorbente para facilitar el proceso de la absorción. La masa de absorbente conteniendo el refrigerante absorbido se transporta, mediante bombeo, hasta otro intercambiador de calor cuya función es separar el refrigerante del absorbente, por destilación del primero.

Este intercambiador de calor se denomina Concentrador o Generador y es de tipo inundado. Por su haz tubular se hace circular el fluido caliente, normalmente agua o vapor de agua, que constituye la fuente principal de energía para el funcionamiento del ciclo de absorción, y que procede como efluente de cualquier tipo de proceso en el que se genere calor residual.

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

En el concentrador se produce la ebullición del refrigerante, que se separa del absorbente y que como consecuencia aumenta su concentración, en el caso de solución salina, o su pureza cuando se trata de agua, para que pueda ser utilizado de nuevo en el proceso de absorción:



El flujo de absorbente vuelve al absorbedor siguiendo un camino mas o menos diferente según cada tipo de máquina, mientras que el flujo de vapores del refrigerante destilado en el concentrador pasa, por simple diferencia de presión, a otro intercambiador de calor por el interior de cuyo haz tubular circula agua procedente también de la torre de refrigeración, y que se denomina condensador porque alrededor de su haz tubular se produce la condensación de los vapores del agente frigorífico para volver al estado líquido.

El líquido obtenido en el condensador se canaliza hacia la cámara de evaporador, por gravedad y por diferencia de presión, ya que esta se encuentra a una presión inferior a la de la cámara del condensador. Cuando el líquido llega a la cámara del evaporador sufre un fenómeno idéntico al comentado en la descripción hecha del ciclo de compresión mecánica, y se evapora

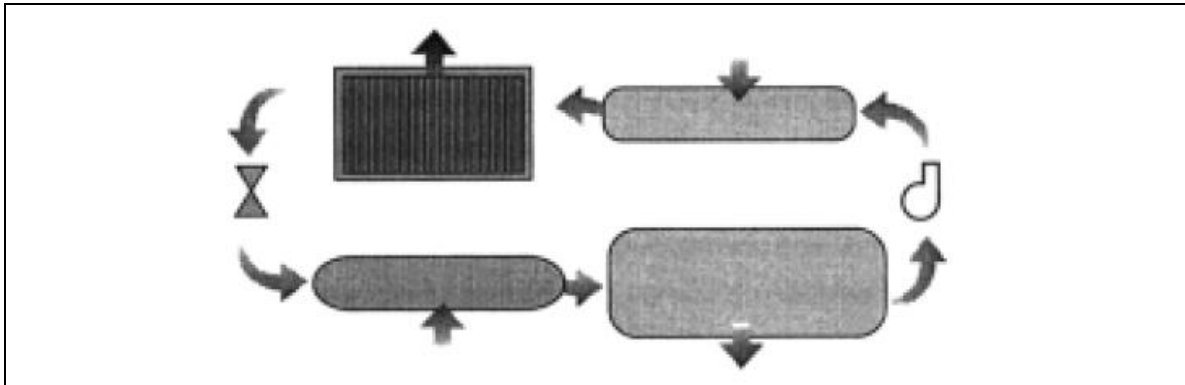
Si comparamos ambos ciclos, comprenderemos que en el de absorción los intercambiadores de calor del Absorbedor y del Condensador, junto con la bomba o bombas que hacen la función de transporte del absorbente, equivalen a su trabajo al compresor del ciclo de compresión mecánica.

Mientras que en el evaporador, condensador y dispositivo de expansión de las máquinas de absorción se desarrollan procesos similares, por no decir idénticos, a los que tienen lugar en sus homónimos del ciclo de compresión mecánica.

“UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

Capítulo I: Principios teóricos sobre refrigeración

Sería válido referirse al Concentrador y Condensador de la máquina de absorción como Sector de Alta Presión, y al Absorbedor y Evaporador como Sector de Baja Presión, siguiendo la similitud con el ciclo de compresión mecánica:



## **CAPITULO II FLUIDOS** **REFRIGERANTES.**

### **II.1 Introducción y definición de los fluidos refrigerantes.**

En este capítulo, se observarán las propiedades de un refrigerante para transportar el calor. Existe una enorme cantidad de refrigerantes que son actualmente utilizados en aplicaciones comerciales e industriales.

Cada refrigerante tiene propiedades que difieren de otros, tales como:

- ⇒ Punto de ebullición
- ⇒ Calor específico
- ⇒ Calor latente
- ⇒ Densidad
- ⇒ Otros factores que afectan la habilidad del refrigerante para transferir el calor

El mantenimiento efectivo de cualquier sistema de refrigeración mecánica depende, principalmente, de la comprensión que se tenga de las propiedades del refrigerante. La dificultad para resolver un problema, se torna más fácil, cuando se sabe cómo reacciona el refrigerante a los cambios de temperatura y de presión. El comportamiento del refrigerante frecuentemente es la clave para detectar el origen del problema.

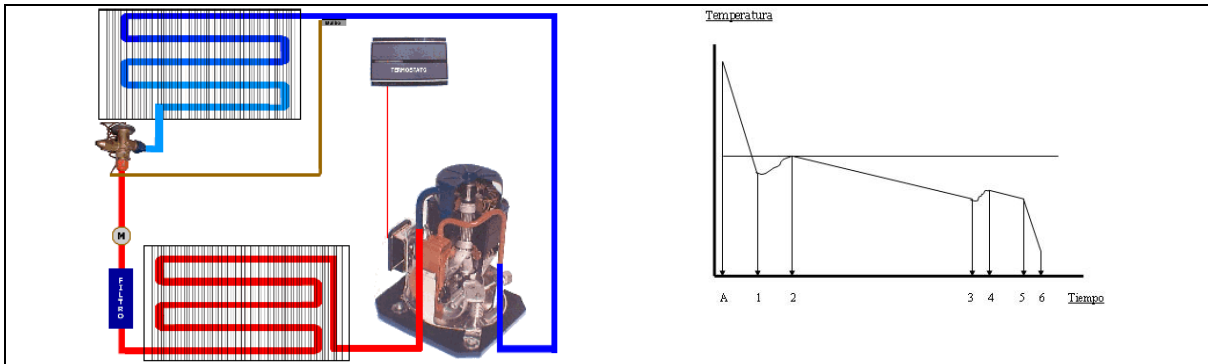
#### **II.1.1 Definición**

De manera general, un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúe como agente de enfriamiento, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia.

Desde el punto de vista de la refrigeración mecánica por evaporación de un líquido y la compresión de vapor, se puede definir al refrigerante como el medio para transportar calor desde donde lo absorbe por ebullición, a baja temperatura y presión, hasta donde lo rechaza al condensarse a alta temperatura y presión.

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo II: Fluidos refrigerantes



Los refrigerantes son los fluidos vitales en cualquier sistema de refrigeración mecánica. Cualquier sustancia que cambie de líquido a vapor y viceversa, puede funcionar como refrigerante, y dependiendo del rango de presiones y temperaturas a que haga estos cambios, va a tener una aplicación útil comercialmente.

Existe un número muy grande de fluidos refrigerantes fácilmente licuables; sin embargo, sólo unos cuantos son utilizados en la actualidad. Algunos se utilizaron mucho en el pasado, pero se eliminaron al incursionar otros con ciertas ventajas y características que los hacen más apropiados.

Recientemente, se decidió descontinuar algunos de esos refrigerantes antes del año 2000, tales como:

- ⇒ R-11
- ⇒ R-12
- ⇒ R-113
- ⇒ R-115

Esto, debido al deterioro que causan a la capa de ozono en la estratosfera. En su lugar, se van a utilizar otros refrigerantes como:

- ⇒ R-123
- ⇒ R-134<sup>a</sup>
- ⇒ Algunas mezclas ternarias

### **II.1.2. Historia de los refrigerantes.**

La práctica de la refrigeración, probablemente ha existido desde la época de las cavernas. Con frecuencia, en la historia se menciona el uso de hielo y nieve naturales para fines de enfriamiento.

Los chinos, y después los romanos, los usaban para enfriar sus bebidas. En algunos lugares donde sólo tienen hielo en el invierno, lo almacenaban en fosos para usarlo en el verano. En lugares desérticos donde no disponían de hielo o nieve en ninguna época del año, como en Egipto, se utilizaba la evaporación del agua para el enfriamiento de bebidas, y hasta algunos dispositivos ingeniosos para hacer la estancia más confortable.

El agua fue el primer refrigerante, con una larga historia de uso, continuando hasta nuestra época. Con el paso del tiempo, se han hecho mejoras en cuanto al manejo y almacenamiento de este recurso, pero aún se utiliza el hielo natural por todo el mundo.

El uso histórico y fundamental del hielo, ha sido reconocido en una unidad de refrigeración: la tonelada de refrigeración, la cual se define como la cantidad de calor que se requiere para fundir dos mil libras de hielo en 24 hrs.

En refrigeración se dio un gran paso adelante, allá por el año 1600, cuando se descubrió que una mezcla de hielo con sal, producía temperaturas más bajas que el hielo solo. En cierta manera, ésta fue la primera mejora sobre la naturaleza en el campo de la refrigeración.

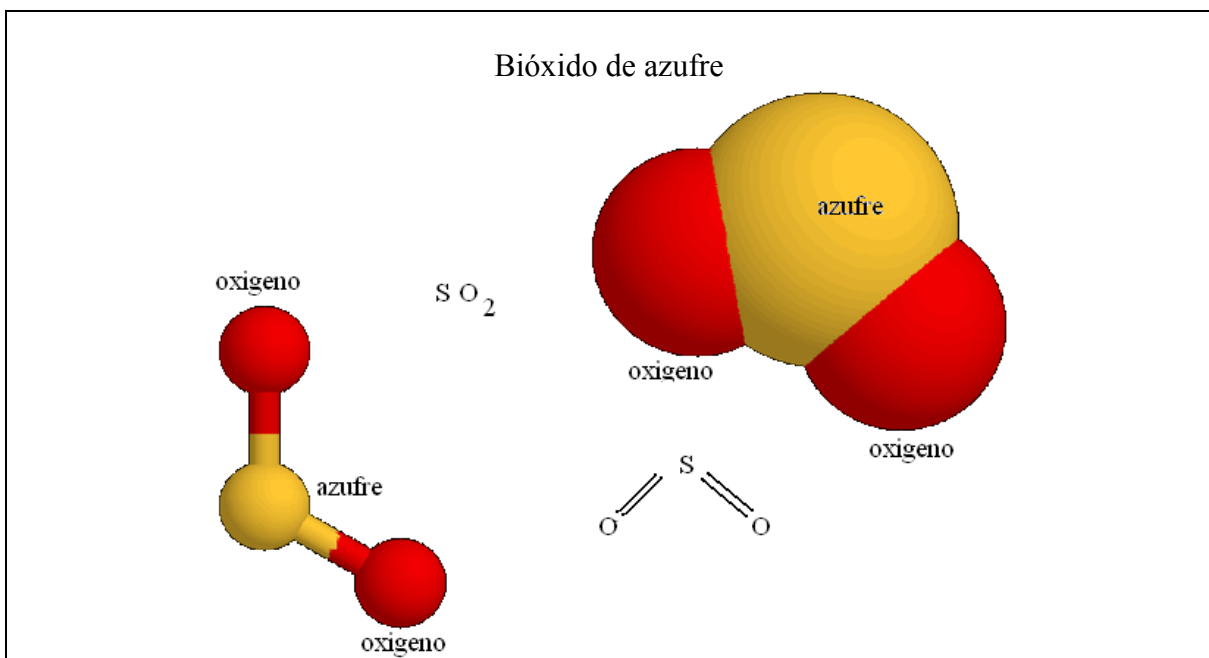
Hacia finales del siglo XVIII, la inventiva del hombre se había dirigido hacia la producción de frío en el momento y tiempo que se deseara. Se desarrollaron máquinas para disminuir la presión del vapor del agua y acelerar su evaporación. También recibió considerable atención el arte de producir frío por la liberación de aire comprimido.

Durante la primera parte del siglo XIX, se desarrollaron máquinas para la compresión de vapor y se probaron muchos fluidos como refrigerantes, entre los que sobresalieron el amoníaco, bióxido de carbono, bióxido de azufre, cloruro de metilo y en cierta medida, algunos hidrocarburos.

A finales del siglo, la refrigeración mecánica estaba firmemente establecida. Por muchos años (desde 1876), al amoníaco se le han encontrado excelentes propiedades como refrigerante, y desde entonces, ha sido el refrigerante más utilizado comúnmente. Aún en la actualidad, ha demostrado ser satisfactorio, sobre todo en refrigeración industrial en grandes plantas.

En las décadas siguientes, la atención fue orientada hacia el mejoramiento del diseño mecánico y la operación de los equipos.

A principios del siglo XX, se desarrollaron las unidades domésticas y los refrigerantes en uso en ese tiempo, padecían de una o más propiedades riesgosas. Algunos eran tóxicos, otros inflamables, y otros más operaban a muy altas presiones; por lo que para estos equipos más pequeños, los ingenieros se enfocaron al refrigerante de más baja presión de operación: el bióxido de azufre.



Este refrigerante tiene algunas fallas serias, tales como:

- ⇒ La formación de ácido sulfuroso cuando se combina con el agua
- ⇒ Es muy corrosivo y ataca las partes del sistema
- ⇒ Cuando se fuga (aún si es en pequeñísimas cantidades), causa tos violenta y ahogamiento.

Estas cualidades indeseables, obligaron a los fabricantes a hacer las unidades menos propensas a fugas y a tener precaución de secarlas, logrando reducir los requerimientos de servicio hasta un punto, donde las desventajas del refrigerante no eran tan grandes.

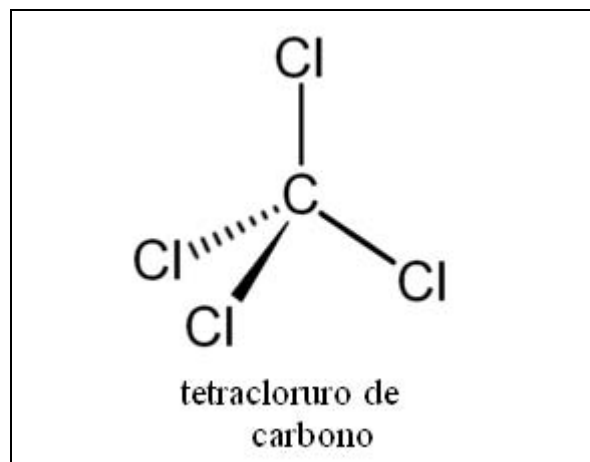


Literalmente, se construyeron millones de esas unidades que utilizaban bióxido de azufre, las cuales operaban satisfactoriamente.

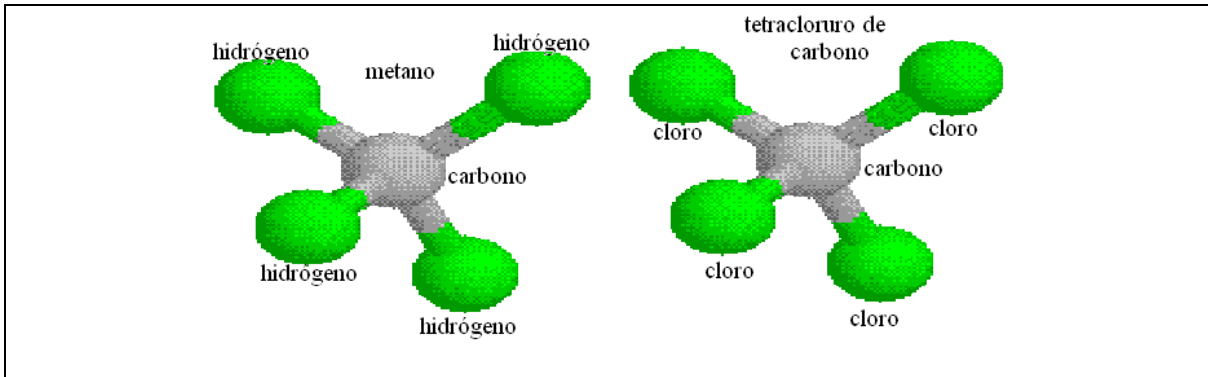
En 1928, el vicepresidente de una importante compañía de automóviles, C.F. Kettering, decidió que la industria de la refrigeración, si quería llegar a alguna parte, necesitaba un nuevo refrigerante seguro y estable, que no fuera tóxico, corrosivo ni inflamable, y que tuviera las características necesarias para poder usarse en equipos compactos.

Kettering solicitó a Thomas Midgely que explorara la posibilidad de desarrollar dicho producto. Un grupo de químicos se pusieron manos a la obra e iniciaron la búsqueda de tal refrigerante. Sabían que las combinaciones de flúor eran muy estables, así que, experimentaron con algunos de los compuestos químicos comunes de carbono, cloro e hidrógeno, sustituyendo átomos de cloro e hidrógeno por átomos de flúor, y en poco tiempo, lograron sintetizar el diclorodifluorometano. Demostraron que no era inflamable y que tenía una toxicidad inusualmente baja.

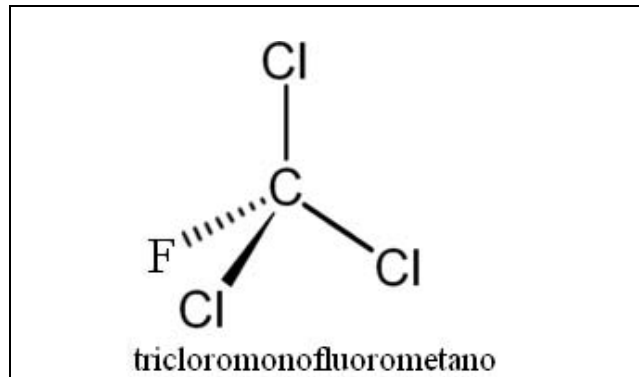
Los experimentos consistieron en reordenar la molécula de tetracloruro de carbono. Este compuesto es utilizado para fabricar algunos refrigerantes halogenados .



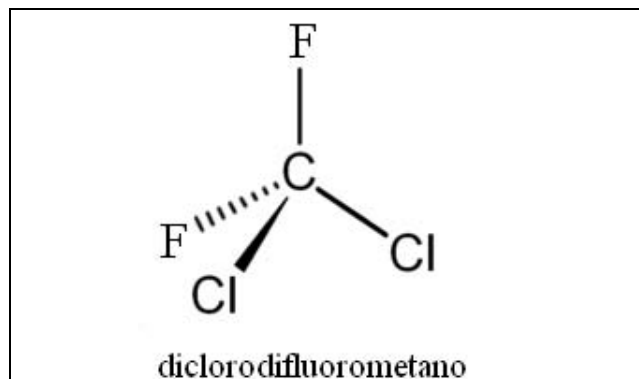
Si este compuesto se compara con el metano, a simple vista se nota una similitud entre ambas; la diferencia está en los elementos que utiliza cada compuesto



Reemplazando un átomo de cloro por un átomo de flúor, se tiene otro compuesto más estable llamado tricloromonofluorometano o R-11:



Y si se reemplazan dos átomos de cloro por de flúor, se obtiene el diclorodifluorometano o R-12.

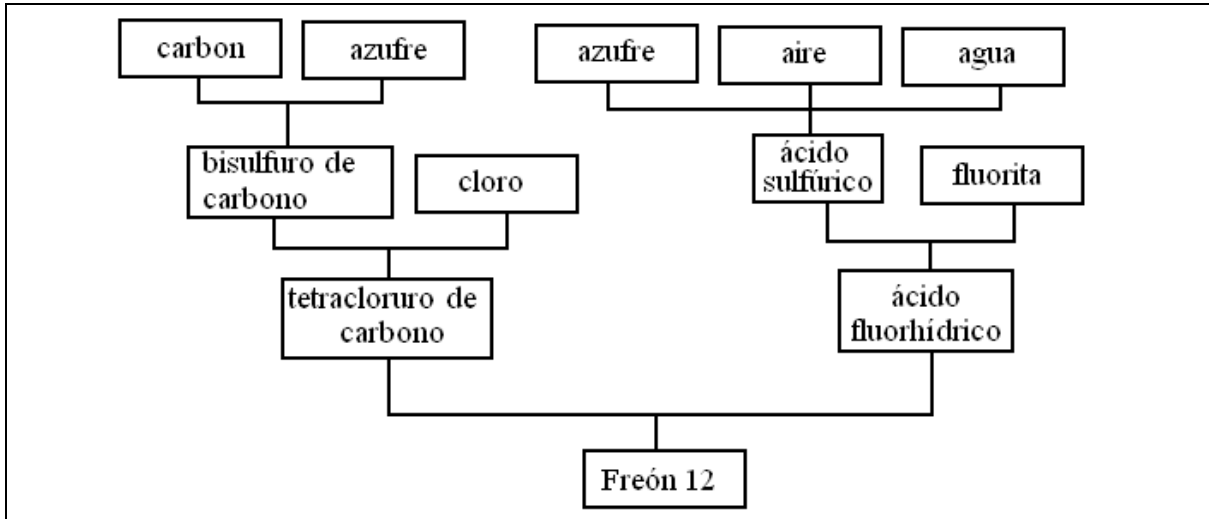


## “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

### Capítulo II: Fluidos refrigerantes

En 1929 se le solicitó a una compañía química, que ayudara a desarrollar un proceso comercial práctico para la fabricación del nuevo refrigerante. Con este desarrollo nació la industria de los refrigerantes halogenados, ninguno de los cuales existía antes.

El primero de ellos fue el Freón 12, que durante muchos años, fue el más popular:



De allí, siguieron:

- ⇒ El Freón 11
- ⇒ El Freón 21
- ⇒ El Freón 114
- ⇒ El Freón 22

Cada uno de estos refrigerantes, con sus propias características muy particulares. Sin embargo, el desarrollo de los refrigerantes Freón no tuvo una recepción entusiasta.

Las comisiones de seguridad eran prudentes en sus sanciones; los técnicos de servicio estaban inconformes respecto a las fugas, porque no los podían detectar con el olfato; los contratistas los rechazaban porque costaban más que el bióxido de azufre, y algunos de los fabricantes líderes, se rehusaban a diseñar el equipo de refrigeración que se ajustara a las propiedades termodinámicas de estos refrigerantes.

Gradualmente, surgieron diseños que usaban pequeñas cantidades de estos refrigerantes costosos. Se diseñaron compresores, evaporadores, condensadores e intercambiadores; se construyeron unidades paquete con un mínimo de uniones, y cada unión estaba cuidadosamente diseñada y fabricada para eliminar fugas.

Se utilizaron nuevos materiales que no podían ser utilizados con seguridad con los antiguos refrigerantes, los técnicos se volvieron expertos en la detección de fugas, y el Freón arribó como un refrigerante aceptado. El resultado fue que los freones eran virtualmente la base de todas las unidades pequeñas, y eran usados también en trabajos grandes de aire acondicionado.

Con el tiempo, se fueron desarrollando otros compuestos halogenados y creció la familia de los freones. Además de refrigerantes, se les encontraron otras aplicaciones, tales como:

- ⇒ Propelentes
- ⇒ Solventes
- ⇒ Extinguidores de fuego
- ⇒ Agentes espumantes

Algunos años más tarde, otras compañías comenzaron a fabricar los compuestos halogenados con otros nombres comerciales.

Para la década de los setenta's, ya había sospechas de que estos compuestos afectaban la capa de ozono de la atmósfera, pero no se podía demostrar, y tal aseveración no era aceptado por los fabricantes.

Al principio de los ochenta's, estudios hechos por científicos de la NASA por medio de satélites, descubrieron un "adelgazamiento" de la capa de ozono en la Antártida, y estudios posteriores, comprobaron que el deterioro del ozono estratosférico era debido a la emisión de compuestos halogenados, principalmente los que contienen bromo y cloro.

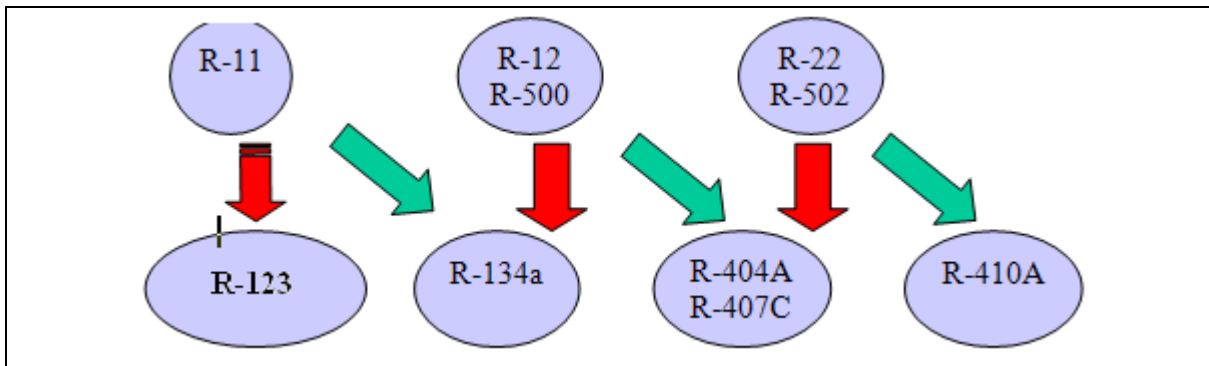
Después de varios años de negociaciones, se llevó a cabo un acuerdo internacional en 1989 en la ciudad de Montreal, Canadá, por lo que se le conoce como el Protocolo de Montreal. Este protocolo es un esfuerzo unido de gobiernos, científicos, industrias y grupos ecologistas coordinados por la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas). Este acuerdo consistió en regular la producción y uso de los clorofluorocarbonos (CFC) de manera gradual, hasta su total defasamiento antes del año 2000, partiendo de la base de los niveles de producción mundial que había en 1986.

Mientras tanto, los fabricantes de refrigerantes trabajaban en la búsqueda de productos nuevos para sustituir los que iban a desaparecer. Rápidamente desarrollaron compuestos para sustituir al R-11 y al R-12, que tienen propiedades termodinámicas muy similares, pero que no afectan la capa de ozono.

Estos refrigerantes son el R-123 y el R-134a, que en la actualidad ya se están produciendo comercialmente, y algunos fabricantes de equipo original ya los están incluyendo en sus unidades.

Dichos productos pueden utilizarse también en equipos usados que actualmente funcionan con R-11 o R-12, haciendo algunas modificaciones al compresor, tales como utilizar aceite sintético en lugar de aceite mineral y cambiar algunos sellos o empaques, por otros de diferente material.

Se desarrollaron también refrigerantes como el R-124 y el R125, para sustituir al R-114 y algunas aplicaciones del R-502, respectivamente.



Otras alternativas aceptables para reemplazar al R-12 y al R-502 durante el período de transición, hasta el defasamiento total, son las mezclas ternarias. Las mezclas ternarias, son mezclas azeotrópicas de tres diferentes refrigerantes de entre los siguientes: 22, 124, 125, 134a, 152a y propano.

Estas mezclas tienen características muy similares a los clorofluorocarbonos, pero con un impacto ambiental grandemente reducido y que requieren un mínimo de cambios en los equipos, comparados con otros refrigerantes alternos. La historia se repite de manera similar, como a principios de la década de los años treinta, cuando se introdujo comercialmente el R-12. La introducción de los nuevos refrigerantes va a requerir de información y capacitación tanto de técnicos, contratistas y fabricantes de equipo original.

Su costo actualmente es entre 2.5 y 4 veces más, pero a diferencia de la primera vez, en esta ocasión son la única alternativa, y además, existe la conciencia ecológica, lo que hace que tengan que aceptarse estos nuevos productos.

Para poder utilizarlos en sistemas que actualmente están trabajando, va a ser necesario rehabilitar el compresor del sistema en lo que se refiere a cambiar algunos materiales como sellos o empaques, ya que los que son compatibles con el R-11 y el R-12, no lo son con el R-123 y el R-134a.

Además, para estos refrigerantes sustitutos se tiene que utilizar aceites sintéticos a base de polialquilenglicol (PAG), de poliol-éster (POE), o de Alquil Benceno.

### **II.1.3 Hechos históricos sobresalientes**

A continuación, se mencionan algunos hechos históricos en el desarrollo de los refrigerantes y la industria de la refrigeración.

1600	Se encontró que una mezcla de nieve y sal, bajaba la temperatura del agua lo suficiente para congelarla.
1775	Un profesor de la Universidad de Edimburgo, utilizó una bomba de aire para reducir la presión y bajar la temperatura de ebullición del agua.
1810	Sir John Leslie, en Escocia, utilizó ácido sulfúrico para absorber vapor de agua y ayudar a mantener una baja presión baja.
1834	La primera máquina refrigeradora práctica que usaba el ciclo de refrigeración, fue construida por Jacob Perkins, en Londres, utilizando éter como refrigerante.
1845	Se usó la expansión de aire comprimido para congelar agua.
1850	Se desarrolló una máquina de absorción práctica y pequeña por E. Carré, utilizando agua y ácido sulfúrico.
1857	James Harrison aplicó con éxito la máquina de Perkins para producir refrigeración en cervecerías, y para enfriar carne y productos perecederos, usando éter como refrigerante.

- 1859 Ferdinand Carré construyó un sistema de absorción con amoníaco y agua.
- 1869 Por estas fechas ya había en existencia varias plantas de hielo.
- 1873 El Dr. Carl Linde introdujo el compresor de vapor de amoníaco.
- 1876 Raoul Pictet construyó un compresor de bióxido de azufre.
- Para embarcar carne de Argentina a Francia, se utilizó éter de metilo.
- 1877 Se iniciaron trabajos de desarrollo en maquinaria de refrigeración por aire, lo que condujo a los compresores Bell-Coleman.
- 1880 - 1890 Se utilizaban exitosamente varios refrigerantes diferentes, principalmente el cloruro de metilo y bióxido de carbono.
- Se desarrolló la demanda de unidades pequeñas para uso doméstico y comercial
- 1900 Apareció el motor eléctrico.
- 1930 En una junta de la sociedad química americana, Midgely y Henne anunciaron a un diario el desarrollo de los refrigerantes halogenados.
- 1931 El freón 12 es lanzado como un refrigerante comercial.
- El 24 de noviembre, la patente original de los refrigerantes halogenados fue expedida a Midgely, Henne y Mc Nary.
- 1932 Introducción comercial del freón 11.
- 1933 Introducción comercial del freón 114.
- 1934 Introducción comercial del freón 113.
- 1936 Introducción comercial del freón 22. Sin embargo, no se desarrolló a grande escala, sino hasta después de la segunda guerra mundial.
- 1939 Introducción comercial del freón 21.

- 1943 Se desarrolló el uso del freón 11 y 12, como propelentes de aerosol, por Goodhue y Sullivan.
- 1945 Introducción comercial del freón 13.
- 1950 Introducción comercial del R-500.
- 1952 La empresa Allied Chemical Corp. inicia la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1955 Introducción comercial del freón 14.
- 1956 Du Pont publicó un sistema para la numeración de refrigerante de uso general.
- 1957 Pennsalt Chemicals Corp. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1958 Union Carbide Corp. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1961 Introducción comercial del freón 502.
- Introducción comercial del freón C-318 como propelente para alimentos, aunque ya había sido usado como refrigerantes unos años antes.
- 1963 Kaiser Aluminum and Chemical Co., inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1965 Racón Inc. inició la fabricación de refrigerantes halogenados.
- 1974 Los científicos Molina y Rowland, presentaron la hipótesis de que algunos gases emanados desde la tierra deterioraban la capa de ozono; lo que fue confirmado años más tarde por la NASA.
- 1989 Se llevó a cabo el Protocolo de Montreal, donde se decidió desfasar los compuestos que deterioran la capa de ozono, entre ellos el R-11 y el R-12.
- En plantas piloto a nivel experimental, los principales fabricantes de refrigerantes desarrollaron compuestos para substituir los refrigerantes que habrán de desaparecer.



- Entre los nuevos sustitutos estaban el R-134a, el R-123, el R-141b, el R-124 y el R-125.
- 1990 Se desarrollaron mezclas zeotrópicas para utilizarlas como refrigerantes, en los equipos que estaban actualmente operando con R-12, R-500 y R-502.
- 1991 Se introdujeron comercialmente los refrigerantes R-134a, R-123 y varias mezclas zeotrópicas.

## **II.2 Refrigerantes puros y mezclas.**

Por muchos años ha habido mucho interés por el uso de refrigerantes mezclados, tanto en el estudio de calorímetros como en pruebas de campo.

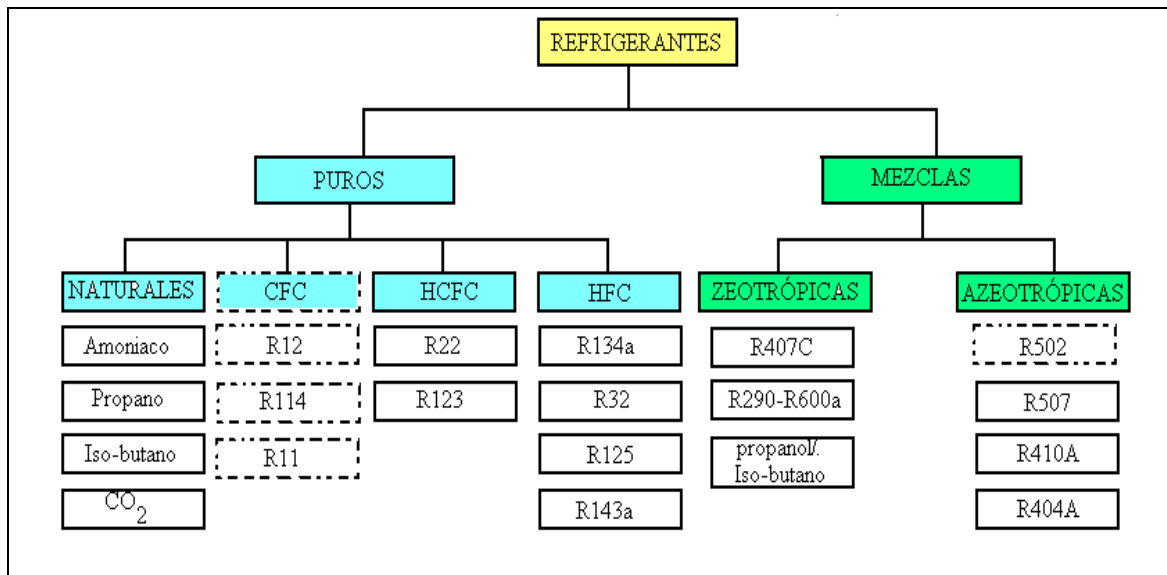
Cuando se considera este tema surgen una cantidad de preguntas. Se trata de conocer lo más posible:

- ⇒ Ventajas
- ⇒ Desventajas
- ⇒ Proceso y seguridad al realizar mezclas
- ⇒ Consideraciones generales
- ⇒ Usos

Obviamente, los refrigerantes que se mezclan deben de ser compatibles entre sí; es decir, no deben tener efectos químicos uno sobre otro, ni inmediatamente ni por un largo periodo.

Cuando se mezclan dos o mas compuestos diferentes, los cuales se utilizan individualmente como refrigerantes, se pueden formar dos tipos de soluciones: una mezcla zeotrópica (o mezcla simple) o una mezcla azeotrópica.

Entre los principales refrigerantes puros y mezclas se encuentran:



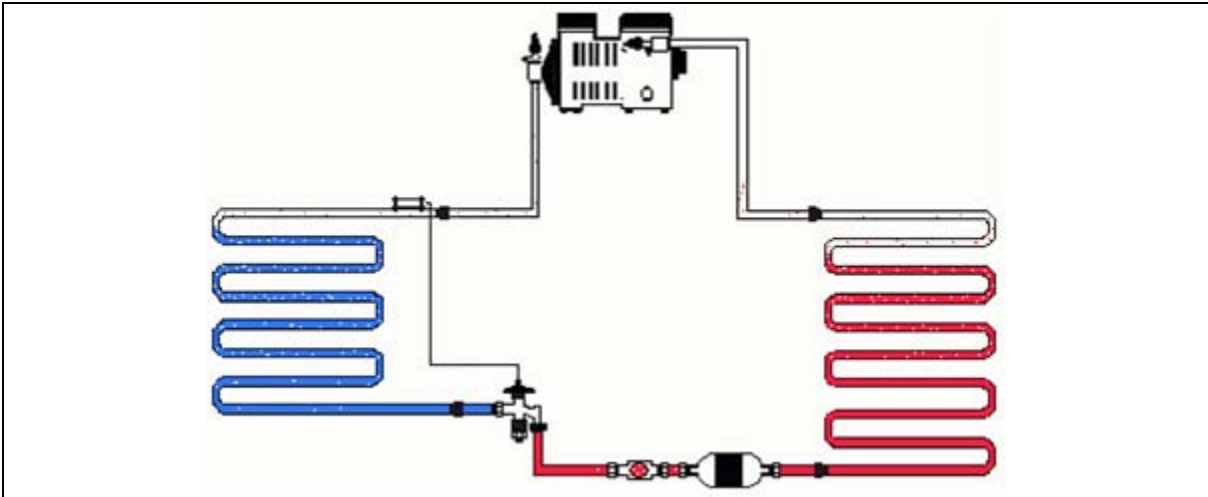
### II.2.1 Refrigerantes puros

Los refrigerantes puros o simples, son sustancias químicas que, por si solas, pueden utilizarse como refrigerante.

Muy pocas sustancias se utilizan como fluido frigorígeno en la práctica, debido principalmente a las condiciones exigibles de seguridad y de rendimiento energético.

### II.2.2 Fluidos frigoríficos

Los fluidos frigorígenos son fabricados en su mayoría por el ser humano, pero también existen fluidos naturales, como el amoniac  $\text{NH}_3$ , el anhídrido carbónico  $\text{CO}_2$ , etcétera. Generalmente se llama a estos fluidos FREON, pero este nombre es una marca comercial, el término correcto es “refrigerante” o “fluido frigorígeno”.



### II.2.3 Mezclas zeotropicas

Se llama así a las mezclas formadas por dos o más componentes (refrigerantes puros) de diferente volatilidad. Cuando estas mezclas se evaporan o se condensan en un sistema de refrigeración, su composición y su temperatura de saturación cambian.

La palabra zeótropo se deriva de las palabras griegas:

zein = hervir  
tropos = cambiar

Al hervir esta mezcla en un evaporador, la composición del líquido remanente cambia. Esto es, al empezar a hervir el líquido, se evapora un porcentaje más elevado del componente más volátil. Por lo tanto, conforme continúa hirviendo la mezcla, el líquido remanente tiene menor concentración del componente más volátil, y mayor concentración del menos volátil.

El cambio de composición del líquido, da como resultado un cambio en el punto de ebullición. La temperatura a la cual empieza a hervir el líquido (líquido saturado), se le conoce punto de burbuja. La temperatura a la cual se evapora la última gota de líquido (vapor saturado), se le llama punto de rocío. A una misma presión, la temperatura del punto de burbuja es más bajo, que la del punto de rocío para cualquier mezcla zeotrópica.

A este fenómeno se le conoce como "deslizamiento de temperatura". En la tabla siguiente, se muestra la composición del R-401A, durante su ebullición. Este es una mezcla zeotrópica formada por R-22 (53%), R- 152a (13%) y R- 124 (34%).

%en peso hervido	(Composición del liquido (% en peso))		
	R- 22	R.- 152a	R-124
0	53.0	13.0	34.0
20	46.6	13.2	40.2
40	37.3	13.6	49.1
60	27.5	13.7	58.8
80	13.8	12.5	73.7
98	0	2.5	97.5

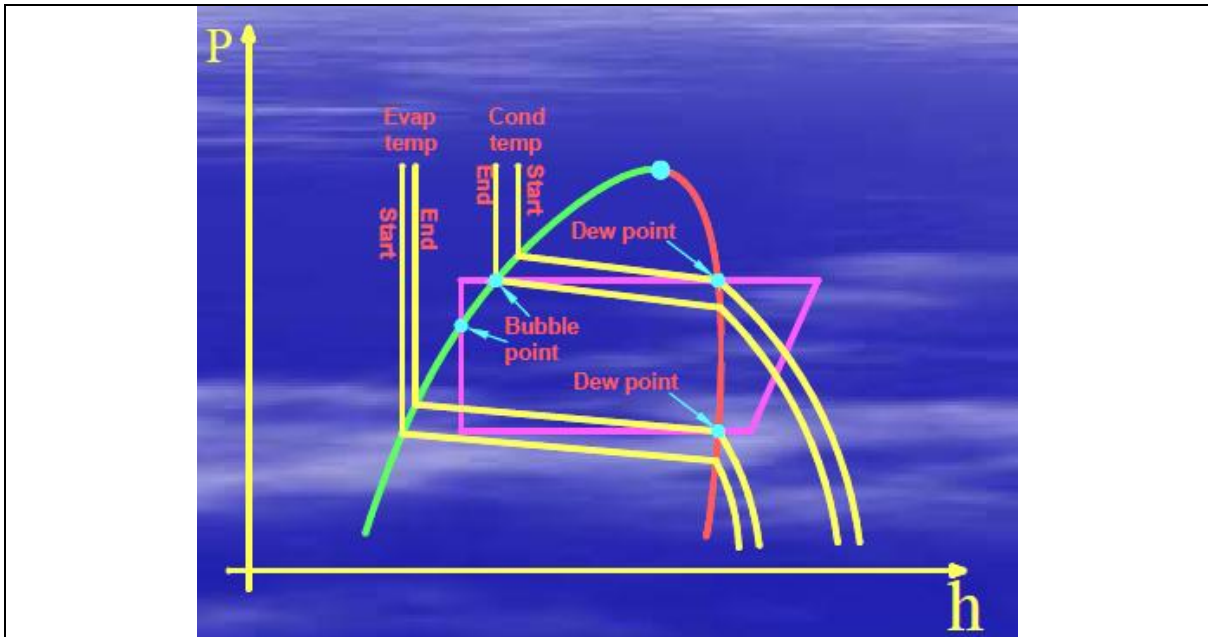
Este deslizamiento de temperatura también ocurre en el condensador, pero aquí, la temperatura de condensación disminuye en lugar de aumentar. El inicio de la condensación es en su punto de rocío, cuando todo el vapor se ha condensado, este es el punto de burbuja.

El deslizamiento de temperatura puede variar, dependiendo de la mezcla, desde 1° ó 2 ° C hasta varias decenas de grados centígrados. Cuando una mezcla tiene un deslizamiento menor, que no conduce a errores consecuentes en el cálculo para una aplicación en un sistema de refrigeración, se le llama "mezcla casi azeotrópica".

De 1990 a la fecha, los fabricantes de refrigerantes han desarrollado más mezclas zeotrópicas de las que existían, hasta antes de dicho año. Estas mezclas son transitorias y se desarrollaron para substituir a los refrigerantes HCFC'S, tales como el R-12, el R-22 y el R-502. Estos últimos van a dejar de fabricarse y usarse alrededor del año 2030. Estas mezclas ya se encuentran disponibles comercialmente, y algunas se van a quedar permanentemente como reemplazos para el R-22 y el R-502.

A las mezclas zeotrópicas comerciales, se les debe asignar un número de identificación en la serie 400.

Básicamente, una mezcla zeotrópica se puede graficar en un diagrama P-h, de la siguiente forma:



#### **II.2.4 Mezclas azeotrópicas.**

Se llama así a las mezclas de dos o más componentes de diferente volatilidad, las cuales, al ser utilizadas en un sistema de refrigeración, NO cambian su composición ni su temperatura de saturación al hervir en el evaporador, o se condensan a una presión constante.

La composición del líquido es la misma que la del vapor. Las mezclas azeotrópicas pueden inclusive ser destiladas, sin que cambie su composición. El prefijo "a" antes de la palabra zeótropo, es de raíz latina, y significa una negación, por lo que la palabra azeótropo se puede interpretar como que "no cambia al hervir".

Al combinar los componentes, la mezcla resultante se comporta en muchas maneras, como si fuera un solo refrigerante puro, con una sola temperatura de saturación correspondiente a una presión dada.

Generalmente el punto de ebullición resultante de una mezcla azeotrópica, es menor o igual que el del componente con el más bajo punto de ebullición, como se puede ver en la tabla siguiente:

Designación del azeotropo	Refrigeración	Punto de ebullición	% en peso	Punto de ebullición del azeotropo
R- 500	R- 12	-30	73.8	-33
	R- 152 <sup>a</sup>	-25	26.2	
R- 501	R- 12	-30	75	-41
	R- 22	-41	25	
R- 502	R- 22	-41	48.8	-45
	R- 115	-39	51.3	
R- 503	R- 23	-82	40.1	-88
	R- 13	-81	59.9	
R- 504	R- 32	-52	48.9	-57
	R- 115	-39	51.8	
R- 505	R- 12	-30	78	-30
	R- 31	-9	22	
R- 506	R- 31	-9	55.1	-12
	R- 114	4	44.9	
R- 507	R- 125	-49	50	-46.7
	R- 143 <sup>a</sup>	-47	50	
Sin numero	R- 22	-41	68	-45
	R- 290	-42	32	
Sin numero	R- 114	4	59	-2
	R- 600	0	41	
Sin numero	R- 12	-30	73	-35
	R- 40	-24	27	

En la tabla, se muestran algunos ejemplos de mezclas azeotrópicas, la mayoría de las cuales no tienen importancia comercial, y en algunos casos, incluyen materiales tóxicos o inflamables.

Las mezclas que contienen refrigerantes clorofluorocarbonos (CFC) como R-12, R-114, R-115, etcétera van a desaparecer, ya que estos refrigerantes CFC se dejaron de utilizar a fines del año 1995.

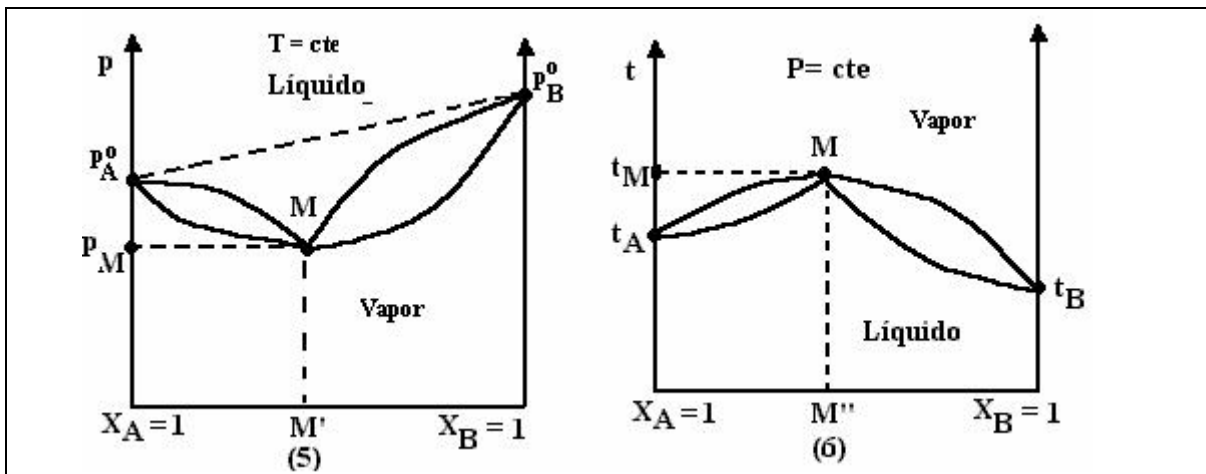
Las mezclas que contienen refrigerantes hidroc fluorocarbonos (HCFC) como el R-22, R-23, R-152a, R-143a, R-125, etc. van a permanecer un poco más tiempo en el mercado, puesto que estos refrigerantes están programados para defasamiento para el año 2030 o antes.

Algunos fabricantes de refrigerantes se han adelantado al defasamiento, y han desarrollado mezclas a base de hidrofluorocarbonos (HFC), los cuales no dañan la capa de ozono.

Estas mezclas surgieron como alternativas para los HCFC'S, tales como el R-22, el R-502 y el R-503 y algunos se van a quedar en forma permanente. Tal es el caso del R-507, el cual es una mezcla azeotrópica con 50% de R-125 y 50% de R-134a, y sustituye al R-22 o al R-502 en aplicaciones de media y baja temperatura.

A las mezclas azeotrópicas que se comercialicen, deberá asignárselas un número de identificación progresiva de la serie 500.

De manera gráfica, se puede representar a una mezcla azeotrópica de la siguiente manera:



### II.3. Características y propiedades de los refrigerantes.

Los refrigerantes poseen ciertas características distintivas que los hacen únicos y listos para aplicaciones específicas; asimismo, también poseen propiedades que permiten su manejo de una manera más ágil y sencilla.

#### II.3.1 Características de los refrigerantes

Las características distintivas de los refrigerantes ideales son:

- ⇒ Punto de congelación. Debe de ser inferior a cualquier temperatura que existe en el sistema, para evitar congelaciones en el evaporador.

- ⇒ Calor latente de evaporación. Debe de ser lo más alto posible para que una pequeña cantidad de líquido absorba una gran cantidad de calor.
- ⇒ Volumen específico. El volumen específico debe de ser lo más bajo posible para evitar grandes tamaños en las líneas de aspiración y compresión
- ⇒ Densidad. Deben de ser elevadas para usar líneas de líquidos pequeñas.
- ⇒ La temperatura de condensación, a la presión máxima de trabajo debe ser la menor posible.
- ⇒ La temperatura de ebullición, relativamente baja a presiones cercanas a la atmosférica.
- ⇒ Punto crítico lo más elevado posible.
- ⇒ No deben ser líquidos inflamables, corrosivos ni tóxicos.
- ⇒ Dado que deben interaccionar con el lubricante del compresor, deben ser miscibles en fase líquida, y no nocivos con el aceite.
- ⇒ Los refrigerantes, se aprovechan en muchos sistemas para refrigerar también el motor del compresor, normalmente un motor eléctrico, por lo que deben ser buenos dieléctricos, es decir, tener una baja conductividad eléctrica.
- ⇒ Ser no inflamable al contacto con el aire.
- ⇒ No tener efectos con la salud de las personas.
- ⇒ Tener un precio razonable.
- ⇒ No propiciar el efecto invernadero.

Estas son las características que tiene que poseer un fluido según las Normas establecidas; sin embargo, actualmente no existe alguno que las cumpla todas.



### **II.3.2 Propiedades de los refrigerantes**

Un refrigerante ideal a de cumplir las siguientes propiedades:

- ⇒ Ser químicamente inerte hasta el grado de no ser inflamable, ni tóxico, ni explosivo, tanto en estado puro como cuando esté mezclado con el aire en determinada proporción.
- ⇒ No reaccionar desfavorablemente con los aceites o materiales empleados en la construcción de los equipos frigoríficos.
- ⇒ No reaccionar desfavorablemente con la humedad, que a pesar de las precauciones que se toman, aparece en toda instalación.
- ⇒ Su naturaleza será tal que no contamine los productos almacenados en caso de fuga.
- ⇒ El refrigerante ha de poseer unas características físicas y térmicas que permitan la máxima capacidad de refrigeración con la mínima demanda de potencia.
- ⇒ La temperatura de descarga de cualquier refrigerante siempre disminuye a medida que baja la relación de compresión. Por lo tanto deseamos que la temperatura de descarga sea la más baja posible para alargar la vida del compresor.
- ⇒ El coeficiente de conductancia conviene que sea lo más elevado posible para reducir el tamaño y costo del equipo de transferencia de calor.
- ⇒ La relación presión-temperatura debe ser tal que la presión en el evaporador para la temperatura de trabajo sea superior a la atmosférica, para evitar la entrada de aire y de humedad en el sistema en caso de fuga.
- ⇒ Temperatura y presión crítica, lógicamente el punto de congelación deberá ser inferior a la temperatura mínima de trabajo.
- ⇒ El punto de congelamiento de congelamiento deberá ser inferior a la temperatura de mínima de trabajo.
- ⇒ Finalmente, ha de ser de bajo precio y fácil disponibilidad

#### **II.4. Clasificación y seguridad de los refrigerantes (CFC, HCFC, HFC)**

Los refrigerantes pueden tipificarse de acuerdo con las características de la Norma; también lo puede hacer de acuerdo con la seguridad que ofrecen.

##### **II.4.1 Clasificación según la Norma Oficial**

Los Refrigerantes, según la Norma Americana NRSC (National Refrigeration Safety Code) se dividen en tres grupos:

- ⇒ Agua
- ⇒ Amoniaco
- ⇒ Freones: Entre ellos los R12, R22, R502 así como, los nuevos gases no perjudiciales para la capa de ozono

Existen en la actualidad tres tipos de refrigerantes de la familia de los hidrocarburos halogenados:

- ⇒ CFC: (Flúor, Carbono, Cloro), Clorofluorocarbono totalmente halogenado, no contiene hidrógeno en su molécula química y por lo tanto es muy estable, esta estabilidad hace que permanezca durante largo tiempo en la atmósfera afectando seriamente la capa de ozono y es una de las causas del efecto invernadero.(R-11, R-12, R-115). Está prohibida su fabricación desde 1995.
- ⇒ HCFC: (Hidrógeno, Carbono, Flúor, Cloro), Es similar al anterior pero con átomos de hidrógeno en su molécula. La presencia de Hidrógeno le confiere menos estabilidad, en consecuencia, se descompondrá en la parte inferior de la atmósfera y no llegará a la estratosfera. Posee un potencial reducido de destrucción de la capa de ozono. Su desaparición está prevista para el año 2015. (R-22)
- ⇒ HFC: (Hidrógeno, Flúor, Carbono), Es un Fluorocarbono sin cloro con átomos de hidrógeno sin potencial destructor del ozono dado que no contiene cloro. (R-134a, 141b).

#### **II.4.2 Clasificación de acuerdo a la seguridad que ofrecen**

En relación con la seguridad de las personas, aunque los refrigerantes circulan por un circuito cerrado, pueden escapar por una fuga o ruptura de los equipos, y en tal caso pueden ser inhalados. En base a lo anterior, surge una nueva manera de clasificar a los refrigerantes:

- ⇒ Alta seguridad: refrigerantes inocuos en caso de inhalación, y que no forman mezclas explosivas con el aire. Son los usados en equipos domésticos y comerciales.
- ⇒ Media seguridad: refrigerantes peligrosos en caso de fugas, por ser tóxicos corrosivos; su mezcla con el aire pueden ser combustible o explosiva a un 3,5 % o más en volumen: Amoníaco, Cloruro de metilo, Anhídrido Sulfuroso...
- ⇒ Baja seguridad: refrigerantes venenosos; su mezcla con el aire puede ser combustible o explosiva a menos de un 3,5 % en volumen. También hay que tener en cuenta que si el equipo contiene un gran volumen de refrigerante, en caso de fuga el gas desplazará al aire de la habitación, y sus ocupantes pueden morir por asfixia. Por ello se limita el tamaño de los equipos en función del tamaño del local.

Estos gases no son tóxicos en estado normal pero en caso de fuga, desplazan el oxígeno produciendo asfixia. Cuando están en contacto con llamas o cuerpos incandescentes el gas se descompone dando productos altamente tóxicos y capaces de provocar efectos nocivos en pequeñas concentraciones y corta exposición.

Básicamente, los refrigerantes pueden agruparse de la siguiente forma:

<b>REFRIGERANTES DE ALTA SEGURIDAD</b>				
<b>Número de identificación del refrigerante</b>	<b>Nombre químico</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Punto de ebullición en °C a 1.013 Bar</b>
R-23	Trifluorometano	CHF <sub>3</sub>	70,01	-82,15
R-123	2,2-dicloro-1,1,1-trifluoretano	CHCl <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub>	153,0	27,96
R-124		CHClF-CF <sub>3</sub>	136,5	-12,05
R-125	2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluoretano	CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub>	120,02	-48,41
R-134a	Pentafluoretano 1,1,1,2-Tetrafluoretano	CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub>	102,0	-26,14
R-401A (53/13/34)	Clorodifluorometano (R-22) 1,1-Difluoretano (R-152a) 2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluoretano(R-124)	CHClF <sub>2</sub> (53%) CH <sub>3</sub> -CHF <sub>2</sub> (13%) CHClF-CF <sub>3</sub> (34%)	94,44	-33,08
R-401B (61/11/28)	Clorodifluorometano (R-22) 1,1-Difluoretano (R-152a) 2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluoretano(R-124)	CHClF <sub>2</sub> (61%) CH <sub>3</sub> -CHF <sub>2</sub> (11%) CHClF-CF <sub>3</sub> (28%)	92,84	-34,67
R-401C (33/15/52)	Clorodifluorometano (R-22) 1,1-Difluoretano (R-152a) 2 Cloro-1,1,1,2-tetrafluoretano(R-124)	CHClF <sub>2</sub> (33%) CH <sub>3</sub> -CHF <sub>2</sub> (15%) CHClF-CF <sub>3</sub> (52%)	101,04	-28,43
R-402A (60/2/38)	Pentafluoretano (R-125) Propano (R-290) Clorodifluorometano (R-22)	CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub> (60%) C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (2%) CHClF <sub>2</sub> (38%)	101,55	-49,19

<b>REFRIGERANTES DE ALTA SEGURIDAD (continuación)</b>				
<b>Número de identificación del refrigerante</b>	<b>Nombre químico</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Punto de ebullición en °C a 1.013 Bar</b>
R-402B (38/2/60)	Pentafluoretano (R-125) Propano (R-290) Clorodifluormetano (R-22)	CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub> (38%) C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (2%) CHClF <sub>2</sub> (60%)	94,71	-47,36
R-404A (44/4/52)	Pentafluoretano (R-125) 1,1,1,2-tetrafluoretano (R-134a) 1,1,1-Trifluoroetano (R-143a)	CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub> (44%) CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub> (4%) H <sub>3</sub> -CF <sub>3</sub> (52%)	97,6	-46,69
R-407C (23/25/52)	Difluormetano (R-32) Pentafluormetano (R-125) 1,1,1,2-tetrafluoretano (R-134a)	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (23%) CHF <sub>2</sub> -CF <sub>3</sub> (25%) CH <sub>2</sub> F-CF <sub>3</sub> (52%)	86,2	-43,44
R-11	Triclorofluormetano	CCl <sub>2</sub> F	137,4	23,8
R-12	Diclorodifluormetano	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120,9	-29,8
R-13	Clorotrifluormetano	CClF <sub>3</sub>	104,5	-81,5
R-13B1	Bromotrifluormetano	CBrF <sub>3</sub>	148,9	-58
R-14	Tetrafluoruro de carbono	CF <sub>4</sub>	88	-128
R-21	Diclorofluormetano	CHCl <sub>2</sub> F	102,9	8,92
R-22	Clorodifluormetano	CHClF <sub>2</sub>	86,5	-40,8
R-113	1,1,2-	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	187,4	47,7
R-114	Triclorotrifluoretano	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	170,9	3,5
R-115	1,2-	CClF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>	154,5	-38,7
R-C318	Diclorotetrafluoretano	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	200	-5,9
R-500	Cloropentafluoretano	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	99,29	-28
R-502	Octofluorciclobutano	CHClF <sub>2</sub> /CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	112	-45,6
R-744	R-12 (73,8%) + R-152a (26,2%) R-22 (48,8%) + R-115 (51,2%) Anhídrido carbónico	CO <sub>2</sub>	44	-78,5

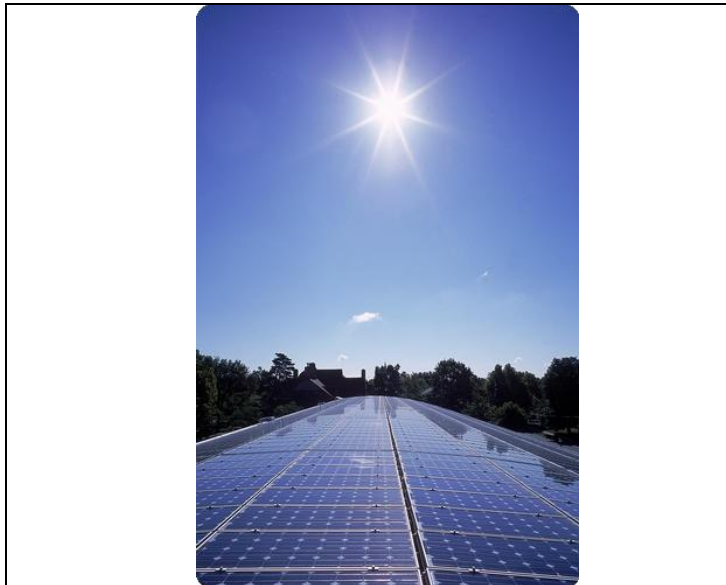
<b>REFRIGERANTES DE MEDIANA SEGURIDAD</b>				
<b>Número de identificación del refrigerante</b>	<b>Nombre químico</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Punto de ebullición en °C a 1.013 Bar</b>
R-30	Cloruro de metileno	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	84,9	40,1
R-40	Cloruro de metilo	CH <sub>2</sub> Cl	50,5	-24
R-160	Cloruro de etilo	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> Cl	64,5	12,5
R-611	Formiato de metilo	HCOOCH <sub>2</sub>	60	31,2
R-717	Amoníaco	NH <sub>3</sub>	17	-33
R-764	Anhídrido sulfuroso	SO <sub>2</sub>	64	-10
R-1130	1,2-Dicloroetileno	CHCl = CHCl	96,9	48,5

<b>REFRIGERANTES DE BAJA SEGURIDAD</b>				
<b>Número de identificación del refrigerante</b>	<b>Nombre químico</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Punto de ebullición en °C a 1.013 Bar</b>
R-170	Etano	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	30	-88,6
R-290	Propano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	44	-42,8
R-600	Butano	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	58,1	0,5
R-600a	Isobutano	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	58,1	-10,2
R-1150	Etileno	CH <sub>2</sub> = CH <sub>2</sub>	28	-103,7

## **CAPITULO III: TECNOLOGIA SOLAR.**

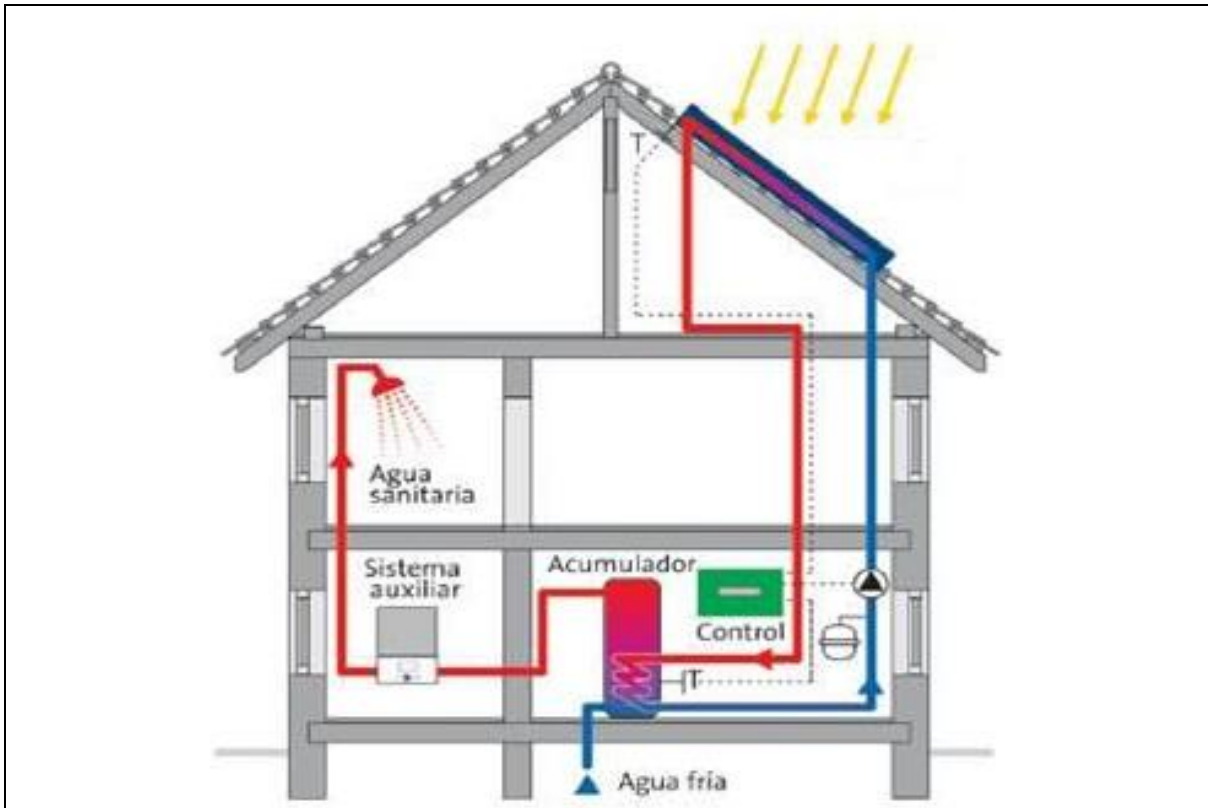
### **III.1 Introducción a la energía solar.**

La energía es un sistema que puede expresarse de diferentes formas. Así según su aspecto externo, atendiendo a sus cualidades de posición y de movimiento se puede hablar de su energía potencial o energía cinética atendiendo sus características internas, se puede hablar de su energía como la capacidad de un sistema para producir trabajo o calor.



La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación.

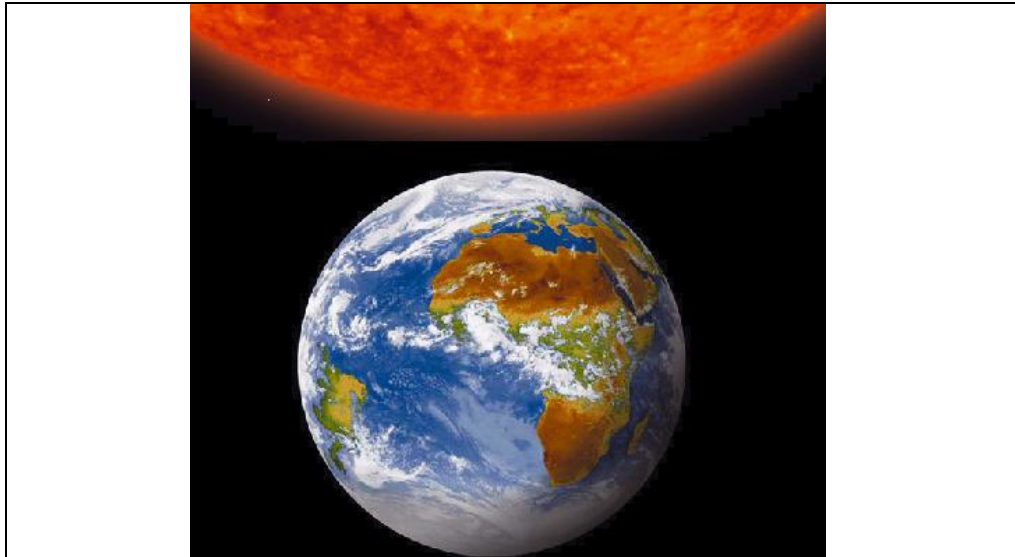
Así, una casa bien aislada puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol. El coste de la «factura de la luz» sería sólo una fracción del que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar.



El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir.





No sería racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

No sería racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que debemos afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno, precisamente cuando más la solemos necesitar.

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, para conseguir las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria.

En la actualidad las emisiones de humos contaminantes siguen aumentando, los árboles se siguen talando sin discriminación y los animales y plantas se extinguen a la velocidad de 5.000 especies por año, 10.000 veces superior a la natural.

Éstas son sólo algunas de las razones por las que el hombre busca aprovechar al máximo lo que se conoce como “las energías renovables”: aquellas que no producen contaminación y que se renuevan.

### **III.1.1. Que es la energía solar.**

Es la energía radiante producida por el Sol, fuente de vida y origen de la demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia que puede satisfacer todas nuestras necesidades.

La parte de la energía del Sol que atraviesa la atmósfera sin experimentar cambios sensibles, se denomina energía solar directa. Aunque se puede aprovechar esta energía sin dispositivos especiales (sistemas pasivos), muchas veces se aplica la tecnología de diversas formas (sistemas activos).

La forma activa más importante de utilización de la energía solar es la conversión térmica, aprovechando la energía que transporta la radiación para elevar la temperatura de algún sistema, pudiéndose aumentar el rendimiento de conversión concentrando la radiación solar mediante lentes o espejos. Otra forma activa para aprovechar la energía de la radiación solar es la conversión fotovoltaica, que permite generar directamente corriente eléctrica a partir de la luz del Sol.

Durante el presente año, el Sol arrojará sobre la Tierra cuatro mil veces más energía que la que vamos a consumir.



### **III.1.2. Historia de las aplicaciones de la energía solar.**

El hombre utilizó desde la más remota antigüedad fuentes de energía que en forma indirecta tiene origen en el Sol.

El Fuego que abrigó al hombre desde la antigüedad, es la forma en que la luz del Sol, acumulada químicamente en las plantas por fotosíntesis, es devuelta al ser éstas quemadas. La idea de utilizar el calor solar es muy antigua, pero el bajo nivel térmico de que disponía el hombre le impidió usarla de forma efectiva durante mucho tiempo.

No obstante, cuenta una leyenda que en el siglo III a.C., Arquímedes utilizó espejos solares para incendiar la flota enemiga que atacaba su ciudad. No se registra ninguna otra utilización de la energía solar hasta el siglo XVIII, cuando comenzó a experimentarse con hornos solares.



En el siglo XIX la conversión de la energía solar en otras formas de energía giró alrededor de la generación de vapor para alimentar máquinas de vapor, aunque también adquirió cierto interés la destilación de agua para su potabilización.

En los inicios del siglo XX aumenta el interés por esta fuente de energía, registrándose numerosas patentes para calentadores solares de agua domésticos durante los años 30 y 40.

Después de la Segunda Guerra Mundial la energía solar adquiere gran relieve, alcanzando su máximo apogeo en EE.UU. durante la década de los 50. Por entonces se desarrollaron desde cocinas solares a máquinas de vapor, y algunos dispositivos eléctricos que utilizaban las entonces nuevas células solares.

Este interés decrece bruscamente en la siguiente década, justo hasta 1973, momento en el cual casi todos los países del mundo se han puesto de nuevo a trabajar en las distintas ramas de la tecnología solar, tanto a gran escala como de aplicaciones domésticas.

### **III.1.3. Características**

Cuando el cielo está claro y el Sol cae verticalmente sobre la tierra, llega un promedio diario de 870 vatios por cada metro cuadrado, en forma de radiaciones electromagnéticas (infrarrojas, luz visible y ultravioletas).

Esta cantidad equivale al consumo diario per cápita de un habitante de un país desarrollado. El Viento se origina por diferencia de presión entre dos puntos de la atmósfera, debido a que uno de ellos fue más calentado que el otro por el Sol. Es éste, por lo tanto, el que mueve los barcos de vela y las aspas de los molinos de viento.

El Agua, que mueve los molinos de río y actualmente también las turbinas de las centrales hidroeléctricas, fue previamente evaporada por el Sol, elevándola desde lagos, ríos y mares hasta las altas montañas, desde donde baja y entrega su Energía a aquellas máquinas.

Existen también antecedentes de aplicación directa de la Energía Solar. Ya en la Grecia clásica Arquímedes la utilizó. Según la leyenda, confirmada recientemente en forma experimental, el gran matemático y físico prendió fuego a la flota romana durante la Segunda Guerra Púnica (218-201 A. C.), con la ayuda de un espejo esférico formado con escudos metálicos pulidos y del fuerte Sol del mediterráneo.

También se han encontrado lupas primitivas y representaciones de espejos cóncavos en las minas de Nínive y en otras ciudades mesopotámicas. Estos experimentos con lentes y espejos datan de muchos siglos atrás. Sin embargo, desde aquellas épocas no se han producido una utilización de la Energía Solar directa en gran escala.

A mayor altura sobre el nivel del mar la radiación es mayor ya que el aire, a ser menos denso, absorbe menos energía. A, 4000 metros sobre el nivel del mar la radiación es un tercio más intensa; en el espacio es aún 50% mayor.

Partiendo de estos datos se puede realizar las siguientes estimaciones: Para cubrir los requerimientos de energía de la humanidad en el año 2000 bastaría para cubrir una zona propicia de 100,000 kilómetros cuadrados de extensión (1/8 de la superficie del desierto de Sahara). Es decir que el 0.4 por mil de la energía que recibimos diariamente del Sol sería suficiente.

Este cálculo se ha hecho en función de los avances tecnológicos esperados y suponiendo un 20% de rendimiento en el proceso de transformación de la energía. Este cálculo resulta tranquilizador ante la perspectiva de que se agoten las fuentes clásicas de energía: Carbón y Petróleo.

#### **III.1.4. Ventajas de la energía solar.**

Las ventajas de la Energía Solar son muchas, pero principalmente la más importante es ecológica, esto significa que la utilización de fuentes renovables es también satisfactoria desde el punto de vista de la conservación del medio ambiente de nuestro planeta, teniendo por muchos años una casa limpia y sana.

Quienes dedican sus esfuerzos a la preservación del medio ambiente advierten de los diferentes peligros que implica el continuo y desmedido uso del carbón, petróleo y sus derivados.

El fuerte incremento de la proporción de anhídrido carbónico, producto principal de la combustión de aquellas maquinas motorizadas, influye sobre el balance de radiaciones entre el Sol, la atmósfera y la superficie terrestre. Como consecuencia se produce el "Efecto Invernadero" que puede variar el clima actual.

En la República Argentina se pueden advertir una serie de trastornos cismáticos de magnitud pocas veces vista (inundaciones, sequías, grandes nevadas, etcétera). Algo similar ocurriría en el resto de América y en otras regiones del planeta.

Si bien estos fenómenos son atribuibles a diferentes causas, las mencionadas anteriormente constituyen si duda un importante factor de desequilibrio.

He aquí un buen número de buenas razones para incorporar energía solar en nuestros hogares:

- ⇒ Energía Solar Renovable e Inagotable. La Energía Solar está garantizada para los próximos 6.000 millones de años.

- ⇒ Energía Solar Limpia y Ecológica. No deja residuos, es silenciosa, y respetuosa con el medio ambiente ya que no consume combustibles con emanaciones de gases CO<sub>2</sub> u otras sustancias dañinas.
- ⇒ Energía Solar Barata. Su compra e instalación está subvencionada por gobiernos y comunidades y el consumo, por supuesto, es gratis.
- ⇒ Energía Solar Pacífica. Tanto el norte como el sur, el rico como el pobre, todos los países disponen de sol. La Energía Solar no origina guerras, contrariamente al petróleo, el gas, el uranio o el carbón.
- ⇒ Energía Solar Rentable. Es la única fuente de energía en la que los usuarios obtienen beneficios económicos superiores al 100% en térmica y al 500% en fotovoltaica sobre el capital invertido.

### **III.2.- La Constante Solar**

La combinación de tres factores es decisiva:

- ⇒ La distancia Tierra-Sol
- ⇒ El diámetro solar
- ⇒ La temperatura del Sol

Esta combinación determina un flujo luminoso; es decir, un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra. Se llama flujo de "algo" (materia, energía), la cantidad de ese "algo" que pasa a través de una superficie, por unidad de área y por unidad de tiempo.

Por tanto, el flujo luminoso, que es un flujo de energía, tiene unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo. Mucho se ha discutido acerca de si el Sol emite un flujo de energía constante, o se trata de una estrella variable.

Algunos estudios parecen indicar que la variación de la emisión de energía, por parte del Sol, es menor al 1 % a lo largo de un ciclo solar, que dura 22 años. No se conoce a ciencia cierta la causa de estas variaciones.

Para su aplicación en el campo de la ingeniería, la emisión de energía en el Sol puede considerarse constante. El recurso energético solar está mucho más ligado, en la superficie terrestre, a las variaciones meteorológicas, que a las solares.

La radiación emitida por el Sol, junto con sus condiciones geométricas respecto de la Tierra, dan por resultado que, sobre la atmósfera terrestre, incide una cantidad de radiación solar casi constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar.

La constante solar ( $G_{sc}$ ) es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

Se aclaran algunos puntos de esta definición:

- ⇒ Primero, es un flujo de energía; es decir, la constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide, instantáneamente, sobre una superficie de área unitaria.
- ⇒ Segundo, esta superficie hipotética es perpendicular o normal a la dirección de propagación de la luz, lo cual en lenguaje no técnico equivale a decir que "ve al Sol". Es obvio que una superficie en posición oblicua respecto de la dirección del Sol, recibiría un menor flujo de energía.
- ⇒ Tercero, nuestra superficie hipotética se encuentra situada a la distancia media de la Tierra al Sol. Aunque se demostrará hasta más adelante, es claro que la distancia desde la fuente de radiación hasta el plano en cuestión, influye fuertemente en el flujo de energía. Se sabe que la intensidad de la radiación solar es mucho mayor en Mercurio que en la Tierra, y que en nuestro planeta es mucho mayor que en Neptuno. Como la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino elíptica, la distancia Tierra-Sol no es constante, así que debe considerarse un valor promedio, para poder hablar de una constante.
- ⇒ Por último, la ya famosa superficie hipotética, debe estar colocada fuera de la atmósfera para evitar la atenuación de la radiación causada por la diversidad de fenómenos físicos y químicos que se verifican en la atmósfera.

El valor comúnmente aceptado para  $G_{sc}$  ha variado en los últimos años, según las técnicas de medición que se han empleado, lo cual no indica que haya variado en sí la magnitud de la energía que se recibe del Sol. En este trabajo se usará el valor:

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

que, en otras unidades equivale a:

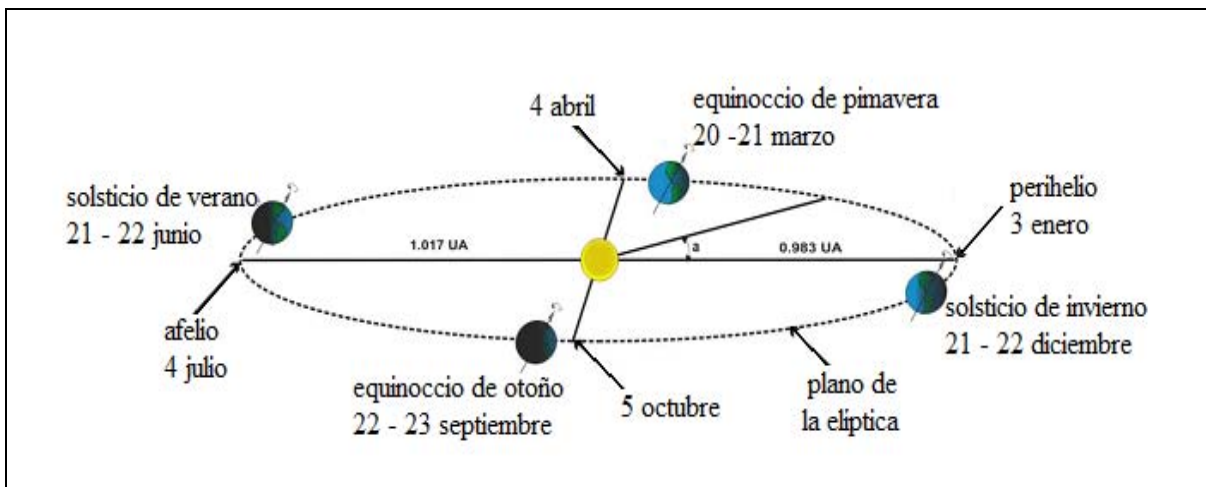
$$G_{sc} = 1.940 \text{ cal/cm}^2\text{-min} = 428 \text{ BtU/ft}^2 \text{-hr} = 4871 \text{ MJ/M}^2\text{-hr.}$$

Estos valores fueron aceptados por la NASA (1971) y por la ASTM.

### III. 2.1. La radiación normal extraterrestre.

Como se ha expuesto, la radiación extraterrestre que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol. Por otro lado, la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino casi elíptica.

La pequeña excentricidad de la órbita hace que, alrededor del 4 de Enero, cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al Sol), la radiación solar extraterrestre sea máxima. Por otro lado, alrededor del 1 de Julio (seis meses después), la Tierra se encuentra en el afelio (máxima distancia al Sol) y entonces la radiación solar extraterrestre es mínima, (Cabirol, 1993).



La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos (360n/365))$$



en donde  $G_{on}$  es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, y "n" es el número de día del año.

En la ecuación anterior, así como en el resto del texto, las normas para los subíndices son como sigue:

- ⇒ El subíndice "sc" se usa para la constante solar (del inglés solar constante)
- ⇒ El subíndice "o" se usa para la radiación extraterrestre, esto es, fuera de la atmósfera
- ⇒ El subíndice "n" se utiliza para la radiación medida en un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.
- ⇒ El subíndice "on" se utiliza para la radiación extraterrestre observada en un plano normal a la radiación.

La tabla siguiente contiene información para calcular el valor de n:

Mes	“n” para convertir el i-ésimo día del mes
Enero	i
Febrero	31 + i
Marzo	59 + i
Abril	90 + i
Mayo	120 + i
Junio	151 + i
Julio	181 + i
Agosto	212 + i
Septiembre	243 + i
Octubre	273 + i
Noviembre	304 + i
Diciembre	334 + i

### III.2.2. Distribución Espectral.

El sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada Radiación Térmica que incluye sólo:

- ⇒ Ultra Violeta (UV)
- ⇒ Radiación Visible (VIS)
- ⇒ Radiación Infrarroja (IR).

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en virtud de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida:

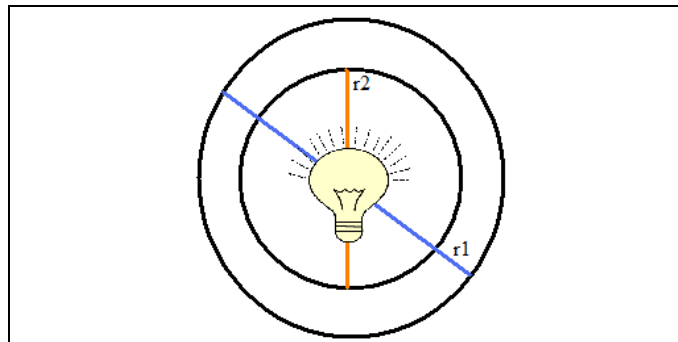
- ⇒ La intensidad de la emisión es mayor, refiriéndose a, un mayor número de watts por metro cuadrado abandonan el cuerpo.
- ⇒ El color o tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda, esto es, del IR al VIS y al UV, a medida que aumenta la temperatura.

La fotosfera se encuentra a unos 6000 (OK) y, por tanto, emite un cierto flujo de energía correspondiente a esa temperatura.

### **III.2.3. Variación del flujo de energía con la distancia.**

Cuando se tiene una fuente luminosa que emite en todas direcciones, la intensidad luminosa o flujo de energía varía inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente emisora.

Una deducción muy sencilla de esta expresión, puede hacerse como sigue: Considérese una fuente luminosa cualquiera: una bombilla incandescente, una estrella, el Sol, que emite energía en forma homogénea en todas direcciones. Considérense dos esferas concéntricas, de radios  $r_1$  y  $r_2$ , mucho mayores que el de la fuente luminosa, cuyo centro coincida exactamente con la posición de dicha fuente.



Supóngase que se mide la intensidad luminosa (flujo de energía) en la superficie de la esfera con radio  $r_1$ , y llámese a ese valor  $G_1$ . La potencia (energía por unidad de tiempo) que pasa a través de la esfera completa estará dada por  $G_1$  multiplicada por el área de la esfera:

$$\text{Potencia}_1 = 4\pi r_1^2 G_1$$

Por otro lado, si se llama  $G_2$  a la intensidad luminosa medida a la distancia  $r_2$ , se tendrá, mediante el mismo razonamiento, que la potencia evaluada en la superficie de la esfera "2" es:

$$\text{Potencia}_2 = 4\pi r_2^2 G_2$$

Si además se considera que el espacio que separa las dos esferas es perfectamente transparente; es decir, no absorbe radiación, entonces la misma energía por unidad de tiempo que atraviesa la esfera "1" debe atravesar la esfera "2".

Por tanto:

$$\text{Potencia}_1 = \text{Potencia}_2$$

Entonces, se puede determinar que:

$$4\pi r_1^2 G_1 = 4\pi r_2^2 G_2$$

De lo cual se reduce entonces de la forma:

$$r_1^2 G_1 = r_2^2 G_2$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son las distancias correspondientes a los puntos en los que el flujo de energía es  $G_1$  y  $G_2$

Esta ecuación es de uso bastante general. Su uso es para relacionar intensidades luminosas producidas por lámparas a ciertas distancias (útil en fotografía, por ejemplo), lo mismo que para calcular la constante solar en diversos planetas.

Sin embargo, no se aplica para la luz emitida por medio de reflectores parabólicos, láseres, etcétera, cuya emisión es dirigida y no cumple con la hipótesis de dispersarse en todas direcciones.

### **III.3. Radiación solar.**

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones, en el sector de la agricultura, ingeniería, entre otros, destacándose:

- ⇒ El monitoreo del crecimiento de plantas
- ⇒ Análisis de la evaporación e irrigación
- ⇒ Arquitectura y diseño de edificios
- ⇒ Generación de electricidad
- ⇒ Diseño y uso de sistemas de calentamiento solar
- ⇒ Implicaciones en la salud (por ejemplo: el cáncer de piel)
- ⇒ Modelos de predicción del tiempo y el clima
- ⇒ y muchas otras aplicaciones más

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda, la cual puede ser calculada usando la aseveración:

“La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con una temperatura T, viene dada por la ley de Planck”.

La ecuación representativa de la ley de Planck es la siguiente:

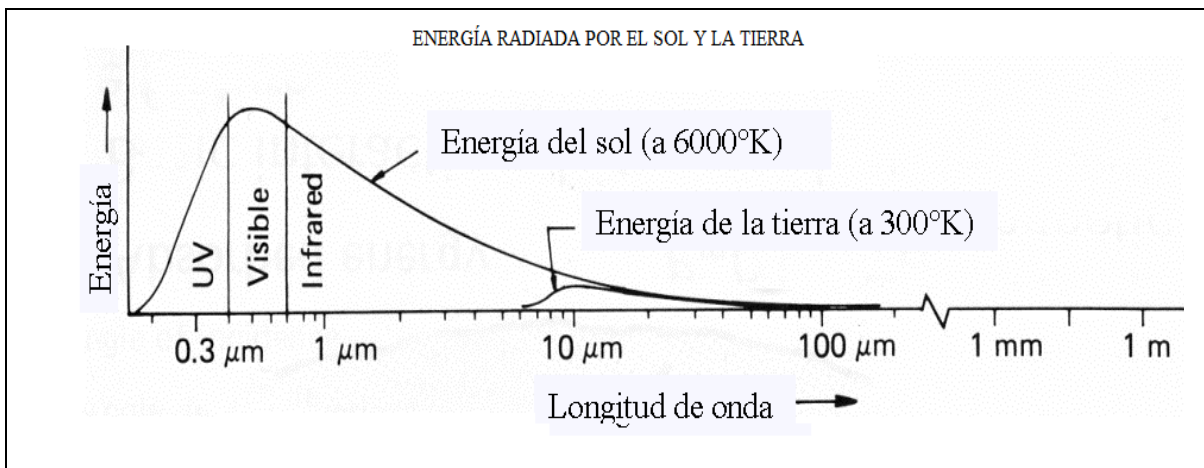
$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

En donde:

- ⇒  $I(\nu, T) \delta$  es la cantidad de energía por unidad de área, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido emitida en el rango de frecuencias de entre  $\nu$  y  $\nu + \delta\nu$
- ⇒  $h$  es una constante que se conoce como “constante de Planck”
- ⇒  $c$  es la velocidad de la luz
- ⇒  $k$  es la constante de Boltzmann

La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley de Wien; y la potencia total emitida por unidad de área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann. Por lo tanto, a medida que la temperatura aumenta, el brillo de un cuerpo cambia del rojo al amarillo y al azul.

Esta longitud de onda corresponde a radiación en la parte del espectro visible.



Por su parte, la ley de Stefan- Boltzmann establece que toda materia que no se encuentra a una temperatura infinita, emite dos radiaciones térmicas. Estas radiaciones se originan a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie más baja por la que fluyen, la velocidad a la que libera energía por unidad de área ( $W/m^2$ ) se denomina la potencia emisiva superficial E. Existe un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por esta ley:

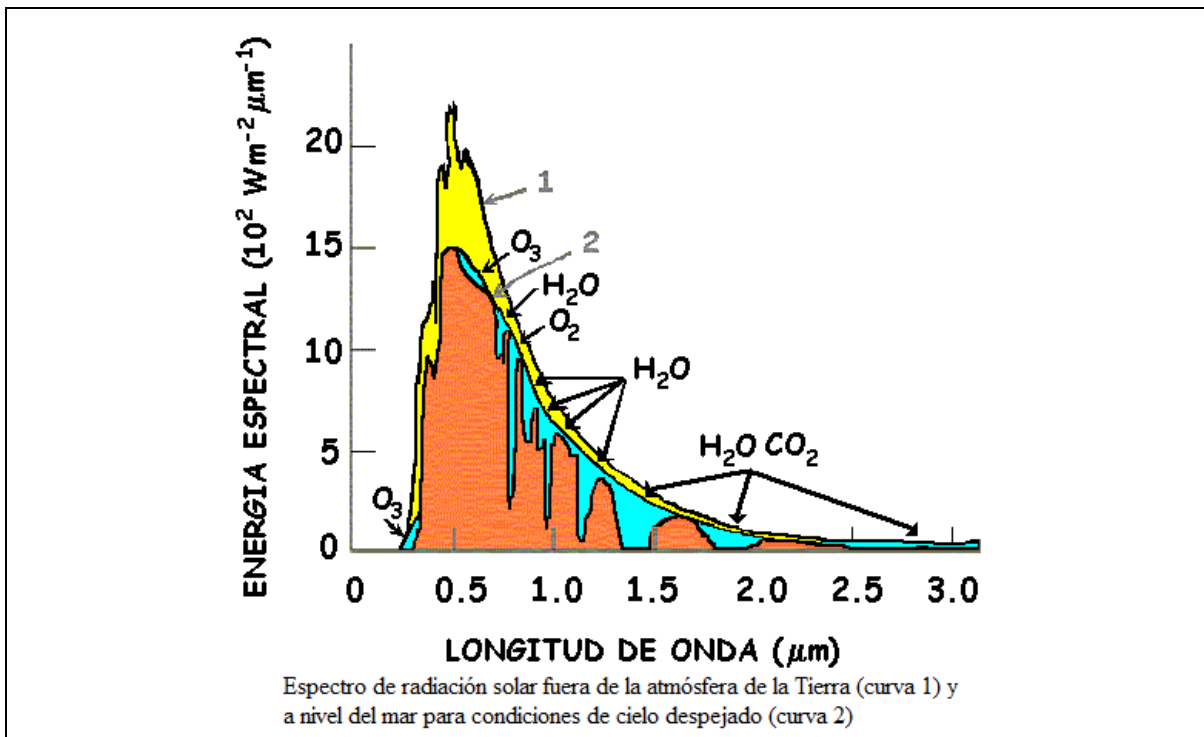
$$Eb = \sigma \cdot T_e^4$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann (dentro de la radiación como mecanismo básico de la transmisión de calor su valor es:

$$5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

Resolviendo la ecuación para una temperatura solar de 5.800 K, la energía total de salida es de aproximadamente 64 millones  $W/m^2$ , de la cual, la Tierra solo intercepta  $1.367 \text{ W/m}^2$  (lo que se conoce como constante solar).

En la figura siguiente, la curva 1 representa la solución ideal de la Ley de Plank de la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, donde el punto más alto de la curva representa la longitud de onda con la mayor energía espectral ( $0,5 \mu\text{m}$ ), de acuerdo con la Ley de Wien y la curva 2 constituye el espectro de la radiación solar después de la absorción atmosférica debida a diferentes gases.



El estudio del espectro de la radiación solar que llega a la superficie del suelo permite establecer que la radiación de longitud de onda menor que  $0,2 \mu\text{m}$  debe ser absorbida totalmente por la atmósfera. Esta energía es absorbida principalmente en la atmósfera por el oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), y el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

### **III.3.1. Conversión de hora civil a hora solar.**

En la mayoría de los cálculos solares se requiere la hora solar, mientras que los relojes indican la hora civil. La hora solar es la que indica un reloj de Sol, es decir el mediodía (12:00 hrs.) corresponde exactamente al paso del Sol por el meridiano.

Como en la práctica esto haría que lugares relativamente cercanos tuvieran horas distintas, se han establecido los husos horarios. Esto evita, por ejemplo, que Mérida, México D.F., Querétaro, Morelia y Guadalajara tengan horas distintas. Como en cada una de estas ciudades la hora solar es diferente, pero la hora civil es la misma, existe una diferencia entre ellas.

En el caso del estado de Guadalajara, el meridiano de referencia tiene  $Lst = 90^0$ , mientras que  $Lloc = 103'$ . Esto hace que Guadalajara esté  $13^0$  al Oeste del meridiano de referencia. Supóngase que en cierto momento, el Sol se encuentra en este meridiano de referencia. (Que, por cierto, corresponde a Mérida, Yucatán).

Entonces, en hora solar, en Mérida son las 12:00 hrs. Como el Sol "viaja" a 151 por hora hacia el oeste, tardará 13/15 de hora en llegar al meridiano de Guadalajara. Esto equivale a 52 minutos. En otras palabras, cuando en el reloj "civil" de Guadalajara son las 12:00, faltan 52 minutos para que sea el mediodía solar. Y a la inversa, cuando es el mediodía solar, el reloj marca las 12:52 ¡casi la una de la tarde!

Otra corrección necesaria está dada por el hecho de que el Sol se adelanta y se atrasa respecto de la hora solar media, debido a dos efectos astronómicamente bien conocidos y estudiados: la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación del eje polar de la Tierra respecto de la órbita.

Nótese que el Sol se "atrasa o se adelanta", según la fecha, hasta más de 15 minutos, respecto de la hora solar media. Aunque para cálculos aproximados se puede despreciar la ecuación del tiempo, en términos generales no es despreciable esta corrección. La ecuación del tiempo se traduce físicamente, por ejemplo, en que el mediodía solar varía de una fecha a otra, efecto que se suma a la variación debida al meridiano de referencia.

Por otro lado, la combinación de la ecuación del tiempo, junto con el de la declinación del Sol a lo largo del año (efectos separados, que no coinciden) y otros factores que no expondremos, se traducen en una variación en las horas de salida y puesta del Sol, todavía mayor que lo anterior. Nótese que, aunque el "día más largo" es el del solsticio de verano y el "más corto" es el del invierno, éstos no coinciden con las fechas extremas de salida y puesta del Sol.

⇒ Hora civil. La que marca el Gobierno de un país, y que puede estar adelantada o atrasada con respecto al GMT.

⇒ Hora solar. La que marca la incidencia del sol en cada meridiano.

La diferencia entre la hora solar (HS) y la hora civil (HC) viene dada básicamente por tres causas, representada por los parámetros:

⇒ Et. Ecuación del tiempo. Debida a la elipticidad de la órbita terrestre. La velocidad aparente del sol (y por tanto, la longitud del día) fluctúa a lo largo del año.



- ⇒ Dg. Desviación geográfica. Debida a la diferencia entre la longitud geográfica del lugar y el meridiano de referencia del país, que fija la misma hora civil para todo el país.
- ⇒ I. Incremento horario. Debido a causas económicas, hay un adelanto de 1 o 2 horas sobre la hora solar dependiendo de la estación del año.

Las fórmulas empleadas para el cálculo son:

Ecuación del tiempo:

$$Et = -[9.93\sin(198+1.971N)+7.37\sin(175+0.986)]$$

Desviación geográfica:

$$Dg = dl/15 \text{ donde } Dg \text{ es negativa si long Este}$$

Desviación total:

$$Dt = Et + Dg$$

Incremento horario:

$$I = +2 \text{ horas (verano) o } +1 \text{ hora (invierno)}$$

Hora solar:

$$HS = HC - Dt - I$$

Hora civil:

$$HC=HS+DT+I$$

Orden del día del año:

$$N=1 \text{ (1 de enero)} \quad N=365 \text{ (31 diciembre)}$$

Diferencia de longitud geográfica:

$$dL=\text{longitud local}-\text{Meridiano de referencia}$$

Meridiano de referencia:

$$M. \text{ de greenwich} = 0^{\circ}00'00''$$

Margen de error en HS y HC calculadas  $\pm 1$  minuto

### **III.3.2 Estimación de radiación en un día despejado.**

Hasta ahora sólo se ha mencionado la radiación extraterrestre. La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable.

Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa. Es muy difícil desarrollar modelos para predecir con precisión la presencia de nubes (posición, densidad, etcétera).

Existen modelos para predicción de "días promedio" en cierta fecha, pero no para fechas específicas. Por otro lado, desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía solar, no es interesante la predicción para fechas específicas, pese a que para los meteorólogos éste sea un reto interesantísimo.

En cambio, existe una diversidad de modelos para estimar la radiación solar para días despejados. Básicamente, estos modelos aplican un factor de transmitancia a la radiación extraterrestre. Así, las ecuaciones para la irradiancia e irradiación en períodos cortos, quedan de la siguiente forma:

⇒ Para la irradiancia directa (sub b), normal a la superficie de interés (sub n), en una atmósfera clara (sub c), se tiene  $G_{cnb}$

⇒ Para estimar la irradiancia directa sobre una superficie horizontal en una atmósfera clara, se usa  $G_{cb}$ .

⇒ Para períodos de una hora (pero no para todo el día), es posible también usar el mismo factor de transmitancia para estimar la irradiación en un día despejado.

Como puede suponerse ahora, el problema consiste en el cálculo o la estimación de la transmitancia atmosférica para la radiación directa, y para la difusa. Existen varios modelos para ello. Uno de los más usados es el que se conoce como "Modelo de Hottel" (1976). Este modelo expresa la transmitancia atmosférica, en función del ángulo cenital (mayor transmitancia en dirección vertical, menor hacia el horizonte), de la altura sobre el nivel del mar (mayor transmitancia a mayor altura) y del tipo de clima.

Faltaría entonces estimar la irradiación (o irradiancia en una hora) difusa, para tener el modelo atmosférico completo. La radiación difusa es más difícil de modelar con precisión, pero afortunadamente es menor, desde el punto de vista energético. Generalmente se supone que la radiación difusa proviene homogéneamente de todo el cielo, esto es, no tiene una dirección preferencial.

### **III.3.3. Medición de la radiación solar.**

Para muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector. Existen varios métodos para medir la radiación solar, ya sea en forma de irradiancia o de irradiación.

El método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro. Un piranómetro, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal.

El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecido y el otro, protegido de la radiación. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos. La hipótesis de trabajo de un piranómetro, es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores.

Para evitar ruido en las lecturas, causado por el viento y otros factores meteorológicos, el sensor expuesto a la radiación (y a veces también el otro) suelen estar protegidos por un hemisferio de vidrio. Este hemisferio, de características ópticas adecuadas, permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento por viento, lo cual alteraría la lectura.

Es posible utilizar piranómetros para medir radiación directa y difusa por separado, de la siguiente forma: Se requieren dos piranómetros; uno de ellos se instala horizontalmente y mide radiación global. Al otro se le coloca una "sombra" que consiste en una banda o un disco para obstruir la radiación directa. Entonces, este piranómetro medirá sólo radiación difusa. La resta de la global menos la difusa, da como resultado la directa.

Otro instrumento para medir radiación solar es el piroheliómetro. El piroheliómetro es un instrumento que se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos. Es decir, es un instrumento que mide radiación directa.

A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir el Sol con gran precisión. La información generada por un piroheliómetro debe ser registrada, ya sea por un método gráfico o electrónico. Esto permite entonces integrar las irradiancias en períodos dados, para obtener la irradiancia correspondiente.

Cuando la irradiancia medida está muy por debajo de la de atmósfera clara, se debe generalmente a la aparición de nublados (suponiendo que no se trata de la sombra de un árbol, o de un eclipse). Por otro lado, ocasionalmente puede ocurrir que la radiación medida sea mayor que la calculada con el modelo de atmósfera clara.

Esto puede suceder por varias razones:

- ⇒ Porque efectivamente haya una mayor irradiancia que la calculada
- ⇒ Porque las nubes que rodean al Sol (aparentemente) produzcan un efecto de concentración de la radiación, exagerando la lectura
- ⇒ Por defecto del instrumento, que no responda adecuadamente a ciertas condiciones meteorológicas.

En la siguiente tabla, se muestran algunos instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación:

<b>Tipo de Instrumento</b>	<b>Parámetro de Medida</b>
Piranómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Radiación Global</li> <li>⇒ Radiación directa</li> <li>⇒ Radiación difusa</li> <li>⇒ Radiación solar reflejada. (usado como patrón nacional)</li> </ul>
Piranómetro Espectral	Radiación Global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro Absoluto	Radiación Directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación Directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación Directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación Global
Pirgeómetro	Radiación Difusa
Radiómetro neto ó piranómetro diferencial	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo Solar

### **III.4. Colectores de energía solar.**

Se le llama colector de energía solar a aquellos elementos que captan la luz del sol y pueden procesarla para su uso en beneficio de la sociedad.

#### **III.4.1. Introducción y descripción de los colectores solares planos.**

Se les puede considerar a los colectores solares como una de las invenciones más relevantes de los últimos diez años; esta aseveración se da porque gracias a ellos podemos pensar hoy en cómo reemplazar fuentes de energías no renovables de manera eficiente y no contaminante.

##### **III.4.1.1 Introducción a los colectores solares planos**

Los colectores solares son también conocidos con el nombre de paneles solares y son dispositivos que se utilizan para aprovechar la energía proveniente del Sol; éstos son los encargados de transformarla en energía térmica para luego usarla de manera doméstica o comercial.



Aunque actualmente los científicos y técnicos quieren lograr más aplicaciones a través de estos artefactos, la finalidad de los colectores solares es principalmente calentar agua a partir del uso de la radiación solar; dicho objetivo puede conseguirse de diferentes maneras, es que según la aplicación del agua que se quiera calentar, podemos optar por métodos adecuados para cada caso.

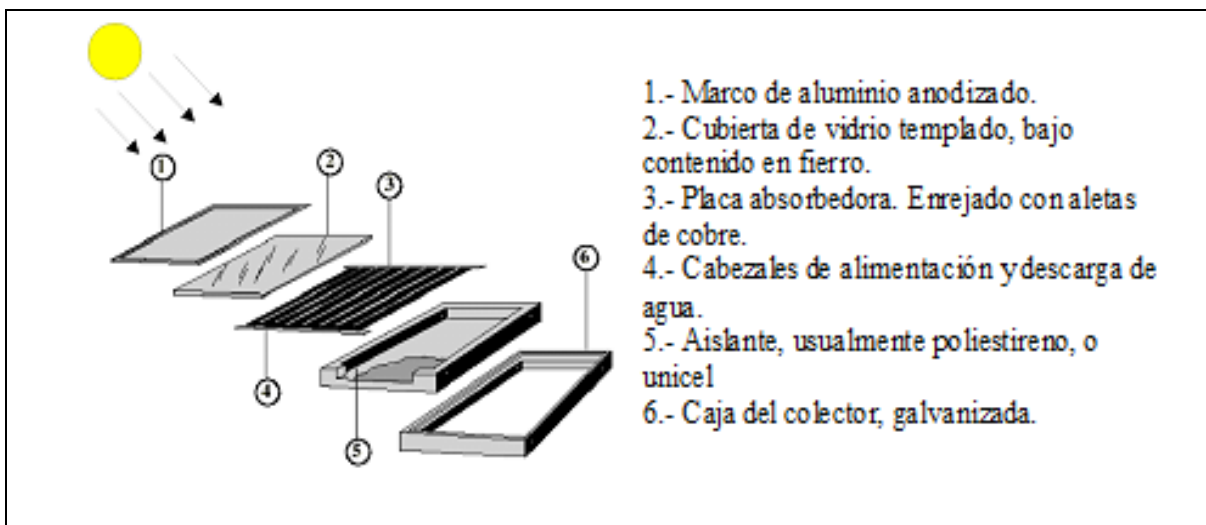
### **III.4.1.2 Descripción de los colectores solares planos**

El colector solar plano es el aparato más representativo de la tecnología solar fototérmica. Su principal aplicación es en el calentamiento de agua para baño y albercas, aunque también se utiliza para secar productos agropecuarios mediante el calentamiento de aire y para destilar agua en comunidades rurales principalmente.

Básicamente, un colector solar está constituido por:

- ⇒ Un marco de aluminio anodizado
- ⇒ Una cubierta de vidrio templado, bajo contenido en hierro
- ⇒ Una placa absorbedora. Enrejado con aletas de cobre
- ⇒ Cabezales de alimentación y descarga de agua
- ⇒ Aislante; usualmente poliestireno o unicel
- ⇒ Caja del colector, galvanizada

Estos componentes se pueden observar en la siguiente figura:



El diseño de cada colector depende fundamentalmente de la aplicación específica a la cual vaya a destinarse. Este debe ser diferente si por ejemplo se trata de calentar agua para una alberca (22 - 30 °C), agua para uso doméstico (40 - 60 °C) o aire para el acondicionamiento calorífico de edificios (90 - 100 °C).

Algunos de los parámetros más importantes que se tienen que tomar en cuenta para su diseño y funcionamiento, son los siguientes:

- ⇒ Tipo de tubo o ducto
- ⇒ Diámetro nominal
- ⇒ Longitud
- ⇒ Número de tubos y espaciamiento entre ellos
- ⇒ Material, espesor y acabado de la placa de absorción o aleta
- ⇒ Número y tipo de capas o cubiertas transparentes
- ⇒ Tipo de aislante y espesor
- ⇒ Tipo de fluido de trabajo y flujo de masa del mismo
- ⇒ Inclinación y orientación del colector
- ⇒ Condiciones ambientales como velocidad del viento y temperatura del aire
- ⇒ La intensidad de la radiación solar.

#### **III.4.2. Tipos de colectores.**

Los colectores solares térmicos son dispositivos capaces de captar la radiación solar y transmitírsela a un fluido, para su posterior aprovechamiento.

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos:

- ⇒ Los Colectores Solares Sin Concentración: Los cuales no superan los 70° C aproximadamente, por lo que son usados en las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura. Un ejemplo de aplicación sería la producción de agua caliente sanitaria.
- ⇒ Los Colectores Solares De Concentración: Los cuales, haciendo uso de los métodos de concentración de la óptica, son capaces de elevar la temperatura de fluido a más de 70° C. Estos se aplican en la energía solar térmica de media y alta temperatura. Podemos encontrar ejemplos de estos en la central solar térmica de Almería (España), en Grenoble (Francia) y en California.

##### **III.4.2.1 Colectores solares sin concentración**

Los colectores solares sin concentración se caracterizan por no poseer métodos de concentración, por lo que la relación entre la superficie del colector y la superficie de absorción es prácticamente la unidad.



Dentro de este grupo se puede hacer una subdivisión en:

- ⇒ Colector solar de placa plana
- ⇒ Colector de aire
- ⇒ Colector de vacío
- ⇒ Tubos de calor
- ⇒ Colectores cónicos o esféricos

En general un colector de placa plana actúa como un receptor que recoge la energía procedente del Sol y calienta una placa. La energía almacenada en la placa es transferida al fluido.

Usualmente, estos colectores poseen una cubierta transparente de vidrio o plástico que aprovecha el efecto invernadero, formado por una serie de tubos de cobre, los cuales expuestos al sol absorben la radiación solar y se la transmiten al fluido que atraviesa su interior. Su aplicación es la producción de agua caliente sanitaria, climatización de piscinas y calefacción.

Los colectores de aire son colectores de tipo plano cuya principal característica es tener como fluido caloportador (portador de calor) el aire. No tienen una temperatura máxima límite (los procesos convectivos tienen una menor influencia en el aire) y trabajan mejor en condiciones de circulación normal, pero en contraposición poseen una baja capacidad calorífica y el proceso de transferencia de calor entre placa y fluido es malo. Su aplicación principal es la calefacción.

Los colectores de vacío van dotados de una doble cubierta envolvente, herméticamente cerrada, aislada del interior y del exterior, y en la cual se ha hecho el vacío. Su finalidad es la de reducir las pérdidas por convección. Son más caros, además de perder el efecto del vacío con el paso del tiempo. Su aplicación principal es la producción de agua caliente sanitaria y climatización de piscinas.

Los tubos de calor poseen una simetría cilíndrica, formados por dos tubos concéntricos; uno exterior de vidrio y uno interior pintado de negro o con pintura selectiva. El fluido circula por el tubo del interno. Su aplicación principal es la calefacción.

Con respecto de los colectores cónicos o esféricos, se puede decir que su principal característica es que constituyen simultáneamente la unidad de captación y de almacenamiento.

Su superficie de captación es cónica o esférica con una cubierta de vidrio de la misma geometría. Con estas geometrías se consigue que la superficie iluminada a lo largo del día, en ausencia de sombra, sea constante. Su instalación es sencilla, pero presentan problemas de estratificación del agua y la superficie útil de captación es pequeña. Su aplicación principal es la producción de agua caliente sanitaria.

#### **III.4.2.2 Colectores solares de concentración**

Los colectores solares de concentración utilizan sistemas especiales con el fin de aumentar la intensidad de la radiación sobre la superficie absorbente y de este modo conseguir altas temperaturas en el fluido caloportador.

La principal complicación que presentan es la necesidad de un sistema de seguimiento para conseguir que el colector esté permanentemente orientado en dirección al Sol.

En este sentido, tenemos:

- ⇒ Concentradores cilíndricos. Su superficie reflectora es la mitad de un cilindro. Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica
- ⇒ Concentradores paraboloides. Su superficie reflectora presenta una geometría de paraboloide de revolución. Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica.

#### **III.4.3. Historia, funcionamiento y tipos de Colectores fotovoltaicos.**

Los colectores fotovoltaicos se han vuelto muy populares, pero en sus inicios no fue así, sino que tuvo que ocurrir un gran proceso para lograr su aceptación (el cual parece que no tiene un final) que, en nuestros tiempos, aún le falta mucho camino por recorrer.

##### **III.4.3.1 Historia de colectores fotovoltaicos**

Las celdas fotovoltaicas son el motor de cualquier sistema solar, es que sin ellas no podríamos contar actualmente con paneles solares o cualquier otro dispositivo que funcione a base de esta energía.

Una celda fotovoltaica tiene como función primordial el convertir la energía captada por el sol en electricidad, a un nivel atómico; muchas de ellas cuentan con una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico lo cual hace que los fotones de luz sean absorbidos para luego irradiar electrones; cuando dichos electrones libres son capturados el resultado que obtenemos es una corriente eléctrica que luego, mediante su conversión, es empleada como electricidad.

Las celdas fotovoltaicas tuvieron su origen gracias a un físico francés llamado Edmundo Becquerel, quien notó que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando los mismos eran expuestos hacia la luz, es así como el principio del aprovechamiento de la energía solar surgiría.

Luego, Albert Einstein describió lo que era el efecto fotoeléctrico, en el cual se basa hoy la tecnología fotovoltaica, por dicho trabajo consiguió el premio Nobel de física. Con toda esta información, conocimientos y avances, los Laboratorios Bell crearon el primer módulo fotovoltaico en 1954 apareciendo allí las primeras celdas fotovoltaicas; como su fabricación era bastante costosa y en aquella época el precio resultaba algo injustificado, la producción de celdas fotovoltaicas decayó hasta 1960.

Fue en este año en donde la industria espacial comenzó a hacer uso de esta tecnología para obtener energía eléctrica y distribuirlas luego a bordo de sus naves; fue a través de los programas espaciales que los científicos y técnicos pusieron énfasis en la energía solar y sus beneficios; cuando su uso alcanzó un alto grado de confiabilidad, se pudo lograr una reducción en los costos.

#### **III.4.3.2 Funcionamiento de colectores fotovoltaicos**

Las celdas fotovoltaicas conocidas también como celdas solares están hechas de materiales semiconductores; en especial de silicio, el mismo que se emplea en la industria de la microelectrónica.

Se emplea una delgada rejilla semiconductor para poder originar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro, claro está; cuando la energía proveniente de los rayos solares llega a la celda fotovoltaica, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor.

La electricidad se obtiene se ponen a los semiconductores tanto positivos como negativos formando un circuito eléctrico, es entonces cuando los electrones son capturados en forma de corriente eléctrica.

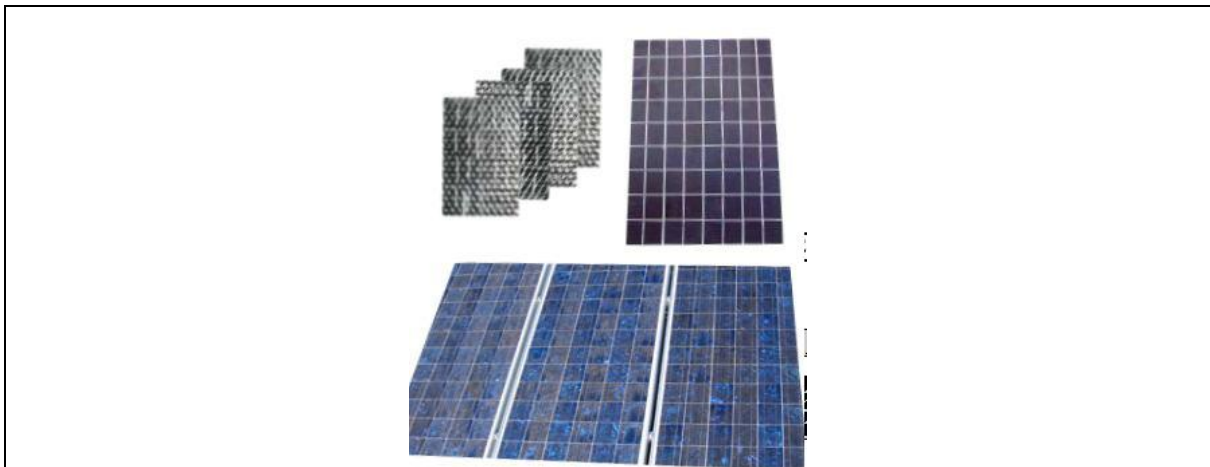
Las celdas son aquellas que, juntas, forman un panel fotovoltaico, pero un arreglo de varias celdas conectadas eléctricamente unas con otras en una estructura generan un módulo fotovoltaico.

Los módulos son construidos con el objetivo de brindar un determinado nivel de voltaje, un ejemplo es un sistema de 12 voltios; la corriente que se produzca dependerá siempre de cuanta luz el módulo capte. Los sistemas de este estilo puede funcionar aisladamente o conectados en red; con respecto a estos último, los mismos interaccionan a través de una interfaz electrónica, es decir, un inversor, que transforma la corriente directa en alterna para poder ser utilizada luego.

La construcción de celdas fotovoltaicas se ha generalizado debido a la falta de sistemas de redes eléctricas y a las grandes áreas rurales y despobladas que el mundo posee en la actualidad

Desde la década de los noventa's, la tecnología fotovoltaica se emplea para suministrar electricidad a diferentes aplicaciones como sistemas de telefonía satelital, educación vía satélite, seguridad y control de plataformas marinas no tripuladas, entre otras aplicaciones.

Las celdas fotovoltaicas son de bajo costo y aplicables en electrificación y telefonía rural como bombeo de agua y protección catódica. En conclusión, las celdas son el motor de cualquier sistema solar, mientras que los rayos solares, el combustible para que las celdas funcionen correctamente; su garantía es no menor a 25 años lo que implica un gran ahorro en mantenimiento o arreglos.



### **III.4.3.3 Clasificación de colectores fotovoltaicos en función de sus materiales**

Existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales semiconductores y los métodos de fabricación que se empleen.

Los tipos de paneles solares que se pueden encontrar en el mercado son:

- ⇒ Silicio puro cristalino
- ⇒ Silicio puro policristalino
- ⇒ Paneles de lámina delgada

Los paneles solares monocristalinos están basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados del 16%. La vista de un panel solar monocristalino es la siguiente:



Los paneles solares policristalinos están hechos con materiales semejantes a los del tipo anterior aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente.

Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los monocristalinos (en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%) siendo su precio también más bajo.

Estos se pueden identificar al verlos; son como sigue:



Por las características físicas del silicio cristalizado, los paneles fabricados siguiendo esta tecnología presentan un grosor considerable. Mediante el empleo del silicio con otra estructura o de otros materiales semiconductores es posible conseguir paneles más finos y versátiles que permiten incluso en algún caso su adaptación a superficies irregulares. Son los denominados paneles de lámina delgada

Así pues, los tipos de paneles de lámina delgada son:

- ⇒ Silicio amorfo. (TFS) Basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (Calculadoras, relojes) y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los módulos comerciales del 8%.
- ⇒ Teluro de cadmio. Rendimiento en laboratorio 16% y en módulos comerciales 8%

- ⇒ Arseniuro de Galio. Uno de los materiales más eficientes; presenta unos rendimientos en laboratorio del 25.7% siendo los comerciales del 20%
- ⇒ Diseleniuro de cobre en indio. Con rendimientos en laboratorio próximos al 17% y en módulos comerciales del 9%

Existen también los llamados paneles Tándem que combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Debido a que cada tipo de material aprovecha sólo una parte del espectro electromagnético de la radiación solar, mediante la combinación de dos o tres tipos de materiales es posible aprovechar una mayor parte del mismo.

Con este tipo de paneles se ha llegado a lograr rendimientos del 35%. Teóricamente con uniones de 3 materiales podría llegarse hasta rendimientos del 50%.

# **CAPITULO IV: REFRIGERACIÓN** **POR ABSORCIÓN**

## **IV.1 Introducción**

La refrigeración por absorción, desarrollada por Michael Faraday en 1824, encontró su hueco. A pesar de que este tipo de refrigeración sea común en situaciones industriales y domésticas, se utiliza cada vez más en las caravanas, barcos, zonas alejadas y comunidades de Amish.

Lo anterior ocurre porque la unidad es pequeña y silenciosa con pocas piezas móviles. El gas LP o un elemento de calefacción eléctrica son usados como fuente de calor, permitiendo que el usuario opere la unidad de forma fácil y segura.

El amoníaco era el refrigerante principal hace muchos años. Con el cambio en la industria de los frigoríficos y acondicionadores de aire causado por las leyes de los refrigerantes, el amoníaco puede muy bien convertirse en el principal refrigerante del futuro.

No hay muchos técnicos de servicio disponibles con formación en los procedimientos adecuados para el reacondicionamiento de las unidades de enfriamiento en un frigorífico por absorción. Por eso, actualmente es un servicio único y muy demandado.

Estos frigoríficos y unidades de enfriamiento, que pueden ser arreglados, están siendo tirados a los vertederos todos los días, tan sólo porque no hay alguien en esa área específica que los pueda arreglar.

En los últimos años se ha intensificado la búsqueda de tecnologías que mejoren la eficiencia de los equipos de consumo eléctrico, de igual manera se han buscado tecnologías que disminuyan el consumo de energía eléctrica y que mejoren la eficiencia de utilización de las fuentes energéticas.

Los equipos de absorción son muy antiguos, pero desde hace algunos años se han dejado de utilizar, hoy en día se presenta como una opción interesante que nos permitirá por un lado bajar a las empresas su consumo de energía eléctrica y en algunos casos utilizar vapor residual de un proceso.



El sistema de refrigeración por absorción es un medio de producir frío que, al igual que en el sistema de refrigeración por compresión, aprovecha que ciertas sustancias absorben calor al cambiar de estado líquido a gaseoso.

Así como en el sistema de compresión el ciclo se hace mediante un compresor, en el caso de la absorción, el ciclo se basa físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias, como el bromuro de litio, de absorber otra sustancia, tal como el agua, en fase de vapor.

Otra posibilidad es emplear el agua como sustancia absorbente (disolvente) y como absorbida (soluta) amoniaco.

Más en detalle, en el ciclo agua-bromuro de litio, el agua (el refrigerante), en un circuito a baja presión, se evapora en un intercambiador de calor, llamado evaporador, el cual enfría un fluido secundario, que refrigerará ambientes o cámaras. Acto seguido el vapor es absorbido por el bromuro de litio (absorbente) en el absorbedor, produciendo una solución concentrada. Esta solución pasa al calentador, donde se separan disolvente y soluto por medio de calor procedente de una fuente externa; el agua vuelve al evaporador, y el bromuro al absorbedor para reiniciar el ciclo. Al igual que los sistemas de compresión que utilizan agua en sus procesos, el sistema requiere una torre de enfriamiento para disipar el calor sobrante.

## **IV.2 Frío por absorción**

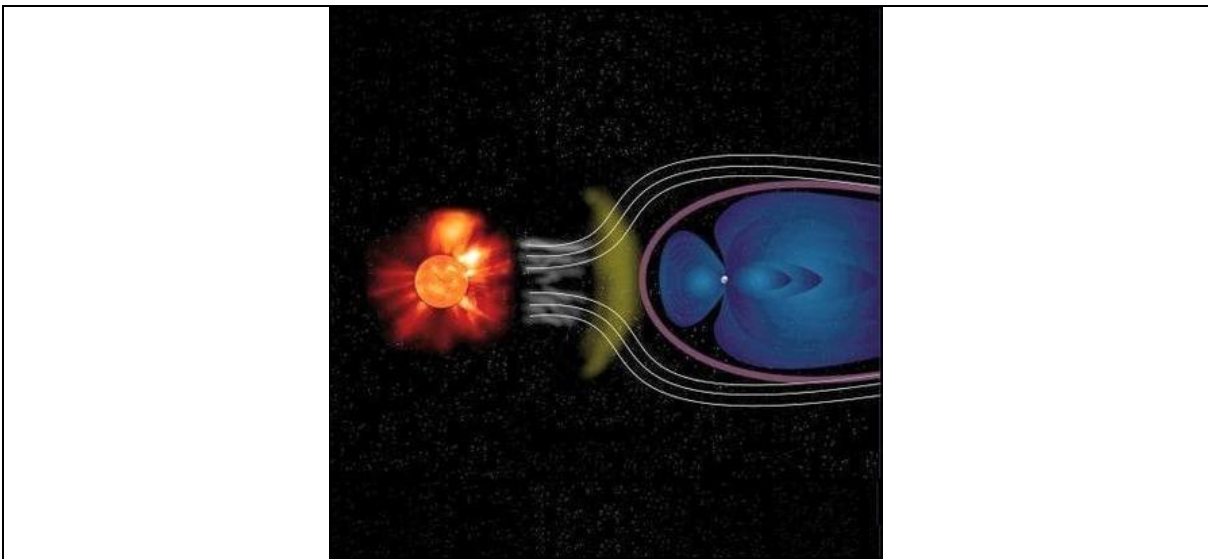
La necesidad de espacios climatizados crece a un ritmo muy notable en el mundo entero. El patrón de utilización de sistemas refrigeradores alcanza su punto más alto en el verano, por lo que no resulta extraño que los límites de capacidad de las redes eléctricas se vean sobrepasados por los altos requerimientos eléctricos de los aparatos de aire acondicionado.

Al mismo tiempo, en la temporada cálida del año, se dan largos períodos de inactividad de las instalaciones de solar térmica, puesto que los requerimientos de calor, en ese momento, son mínimos.

En muchos otros campos de generación de energía, también tienen lugar, en verano, excedentes de calor; estos campos de generación de energía son:

- ⇒ Generadores de electricidad en instalaciones aisladas
- ⇒ Instalaciones de gas biológico
- ⇒ Plantas de cogeneración de energía
- ⇒ Etcétera

En el momento más álgido del verano, cuando el calor se vuelve insoportable, se aproximan a obtener ventajas de las desventajas: una máquina de frío por absorción puede aprovechar este calor para la generación de frío, puesto que la disponibilidad de calor coincide exactamente en el tiempo con el pico de los requerimientos de refrigeración de espacios cerrados.



Lo anterior, trasladado a una instalación solar térmica supone que, gracias al aprovechamiento de los colectores todo el año, se consigue reducir la necesidad de energía para la climatización en un 50%; dado en proporciones de refrigeración y calefacción.

Pero, si se combina la absorción de frío con una planta de cogeneración de energía, se podría obtener un sistema muy eficaz, capaz de transformar el 70% de la energía originaria en energía útil. Se puede generar, al mismo tiempo, electricidad, calor y frío durante todo el año y siempre enfocándose a la necesidades del momento.

### **IV.3 Máquinas de refrigeración por absorción**

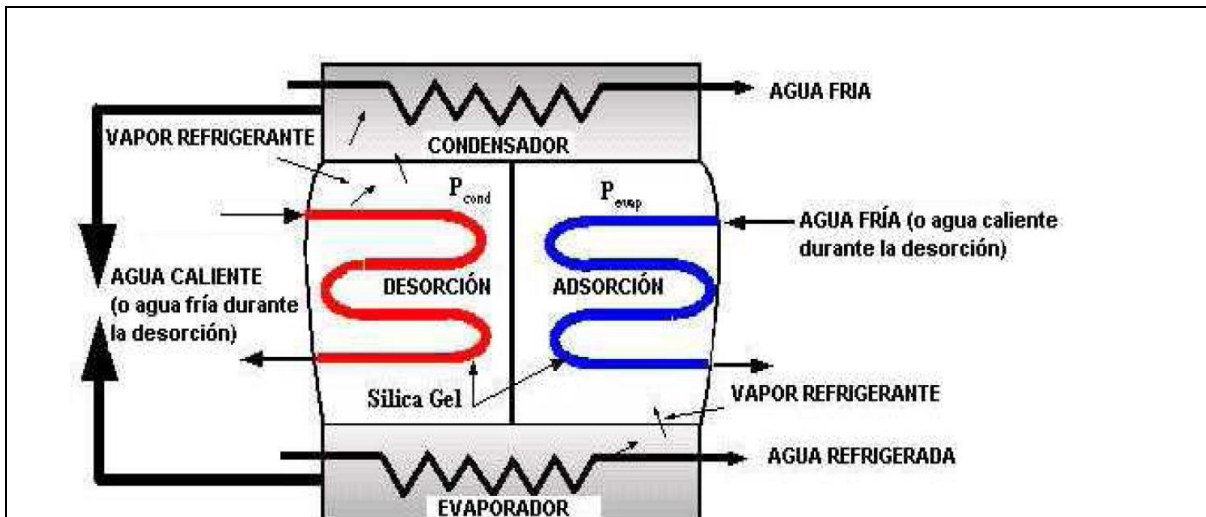
Las máquinas por absorción, son equipos que están formados por uno o más absorbedores (desorbedores), un condensador y un evaporador conectados a los diferentes focos de calor.

El ciclo de absorción es análogo al de compresión tradicional en donde se sustituye la compresión mecánica por la compresión térmica.

Debido a que el sustrato es sólido, no se produce un movimiento físico del adsorbente, por lo que su condición de adsorbedor o desorbedor, viene impuesto por las conexiones exteriores y el punto del ciclo en el que se encuentre.

La cámara intercambia calor alternativamente con un foco caliente a alta temperatura y un foco frío a temperatura intermedia. El condensador intercambia energía con la fuente de calor a temperatura media, y el refrigerante es transportado entre la cámara de adsorción, reactor, condensador y evaporador.

El esquema de una enfriadora por absorción es como sigue:



### IV.3.1 Máquinas de absorción

El ciclo de una máquina de absorción se basa en dos principios básicos:

- ⇒ La relación existente entre el punto de ebullición y la presión de los líquidos.
- ⇒ La afinidad que tienen algunas sustancias por otras.

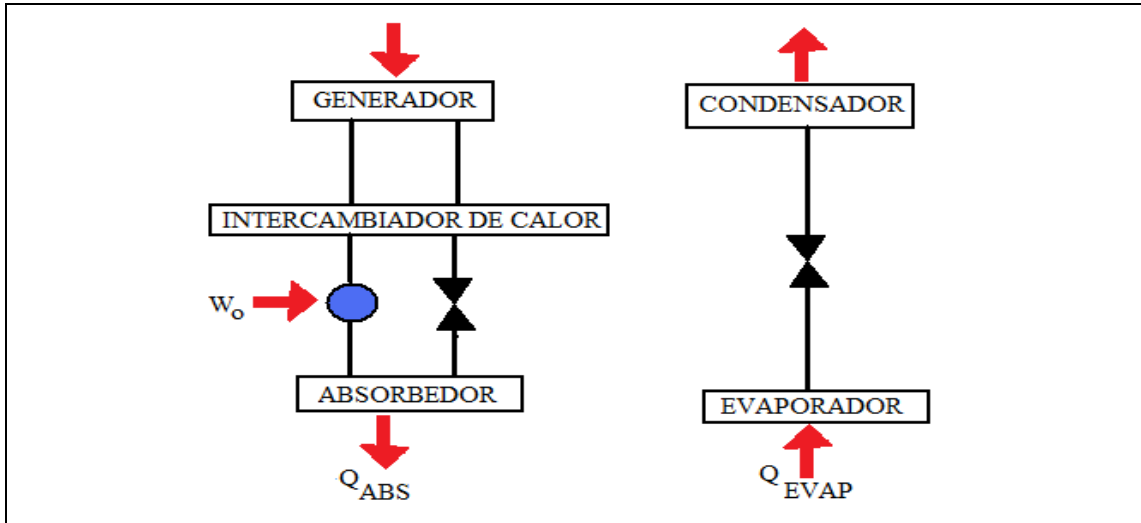
La máquina dispone de cuatro recipientes interconectados, en los que dos se encuentran a baja presión (evaporador y absorbedor) y otros dos a alta presión (condensador y generador).

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo IV: Refrigeración por absorción

Estos niveles de presión están condicionados por las temperaturas de condensación y vaporización del refrigerante.

El esquema básico de una máquina de absorción de simple efecto, se muestra a continuación:



Ahora, de manera física real, podría observarse como sigue:



### **IV.3.2 Máquinas desecantes**

Estos sistemas están basados en la adsorción, pero a diferencia de las máquinas de adsorción, éstos trabajan en ciclo abierto continuo.

Al contrario de las máquinas enfriadoras de agua (ya sean convencionales, de absorción o de adsorción) los sistemas desecantes tratan directamente el aire que se impulsa al local a climatizar.

Hasta la fecha, los equipos de refrigeración por desecantes disponibles han sido considerados muy caros comparados con los equipos de refrigeración mecánica.

La capacidad de secado del sorbente está relacionada por la relación entre el contenido de agua en el equilibrio del desecante y la humedad relativa de la corriente de aire en contacto con él. Por lo tanto, este tipo de sistemas son efectivos en zonas en las que la humedad relativa del aire es baja, sobre todo en verano, lo cual es típico de zonas alejadas del mar o de grandes masas de agua, con elevadas temperaturas de bulbo seco, y bajas temperaturas de bulbo húmedo.

### **IV.4 Ciclo de absorción simple**

De entre las tecnologías de refrigeración con activación térmica destaca la refrigeración por absorción, por las siguientes causas:

- ⇒ Es ampliamente conocida y esta desarrollada
- ⇒ Es utilizada en todo tipo de aplicaciones de refrigeración y de aire acondicionado en diferentes sectores industriales y de servicios (comercial, residencial)
- ⇒ Está disponible comercialmente en toda la gama de potencias
- ⇒ Pueden utilizar diferentes fuentes térmicas de activación: calor residual, termo-solar, combustión, proceso
- ⇒ Tienen fiabilidad y flexibilidad de funcionamiento ( mantienen prestaciones a carga parcial)
- ⇒ Utilizan refrigerantes naturales ( no CFC ni HFCs)

#### **IV.4.1 Fluidos refrigerantes**

Las combinaciones Refrigerante/Absorbente más utilizadas en la práctica son:

- ⇒ Agua / Bromuro de Litio (BrLi)
- ⇒ Amoníaco/ Agua ( NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O)

##### **IV.4.1.1 Tecnología BrLi**

La tecnología BrLi es utilizada ampliamente en enfriadoras de agua comerciales para aplicaciones de aire acondicionado en toda la gama de potencias, especialmente en la gama alta.

Algunas de sus características son las siguientes:

- ⇒ Ciclo de simple efecto

$$\text{COP} = 0.7 \text{ Temperatura de activación} > 85 \text{ }^\circ\text{C}$$

- ⇒ Ciclos de doble efecto

$$\text{COP} = 1-1.2 \text{ Temperatura de activación} > 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

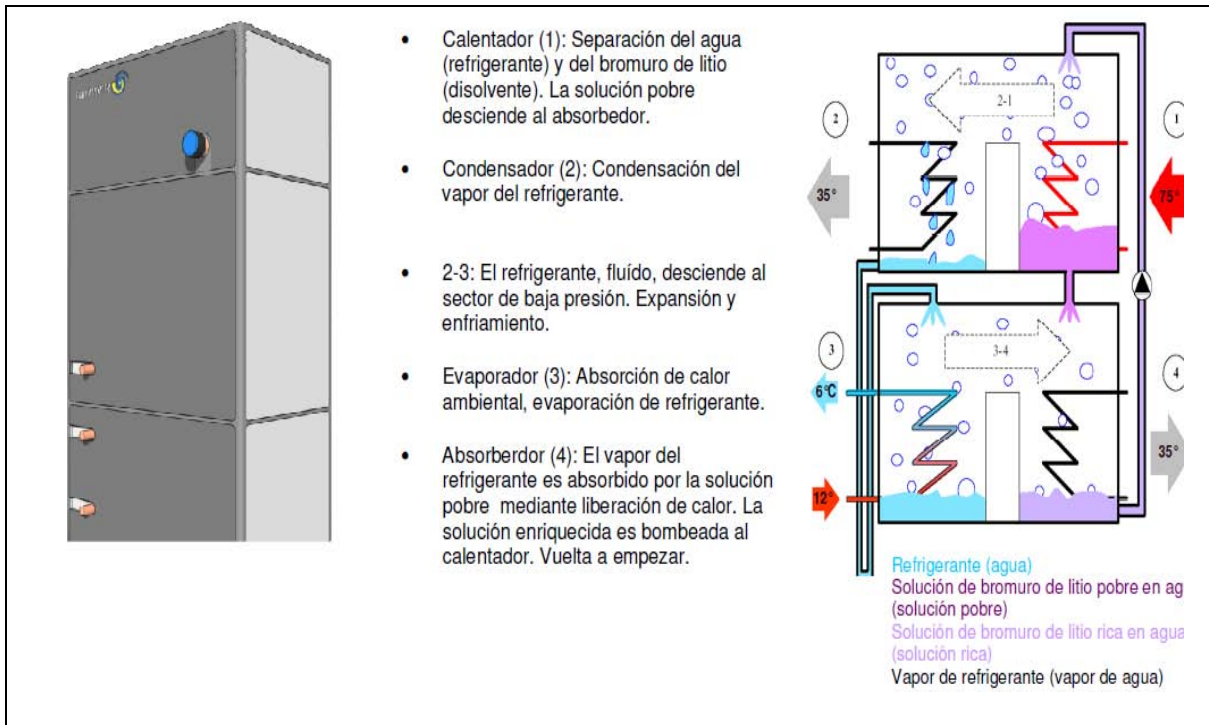
- ⇒ Ciclos de triple efecto ( en desarrollo )

$$\text{COP} = 1.5 \text{ Temperatura de activación} > 200^\circ\text{C}$$

Sus desventajas pueden marcarse como:

- ⇒ Disipación de calor con agua de torres de refrigeración
- ⇒ Cristalización
- ⇒ Corrosión
- ⇒ Alto vacío

Una forma de visualizar una máquina con estas características, se muestra a continuación:



#### IV.4.1.2 Tecnología del Amoníaco/agua

La Tecnología del Amoníaco/Agua es utilizada en aplicaciones de refrigeración industrial y en enfriadoras de agua de llama directa para aplicaciones de aire acondicionado de pequeña potencia (18 kW). En este sentido, cabe mencionar lo siguiente:

- ⇒ Es posible la disipación del calor mediante el aire
- ⇒ No hay problemas de cristalización
- ⇒ Toxicidad del amoníaco limita su utilización
- ⇒ Prestaciones enfriadoras de agua

Sus características son:

⇒ Ciclo simple

$$\text{COP} = 0.6 \text{ Temperatura activación} > 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

⇒ Ciclo GAX (en desarrollo )

$$\text{COP} = 1.0 \text{ Temperatura de activación} > 160 \text{ }^\circ\text{C}$$

La refrigeración que tiene un atractivo económico cuando se tiene una fuente de energía térmica barata a una temperatura de 100 a 200°C, es la regeneración por absorción.

Algunos ejemplos de fuentes de energía térmica barata incluyen la energía geotérmica, la solar, el calor residual de centrales de cogeneración o de vapor de proceso, e incluso el gas natural cuando está disponible a un precio relativamente bajo.

Como su nombre lo indica, los sistemas de refrigeración por absorción implican la absorción de un refrigerante por un medio de transporte. El sistema de refrigeración por absorción más utilizado es el sistema de amoníaco-agua, donde amoníaco (NH<sub>3</sub>) sirve como el refrigerante y el agua (H<sub>2</sub>O) es el medio de transporte.

Otros sistemas de refrigeración por absorción son los de agua-bromuro de litio y el de agua-cloruro de litio, en los que el agua sirve como refrigerante. Los últimos dos sistemas están limitados a aplicaciones como el acondicionamiento de aire, en las que la temperatura mínima queda por arriba del punto de congelación del agua.

Para comprender los principios básicos que implica la refrigeración por absorción, se examina el sistema NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O que se muestra en la figura máquina de refrigeración de amoníaco-agua fue patentada por el francés Ferdinand Carre en 1859.

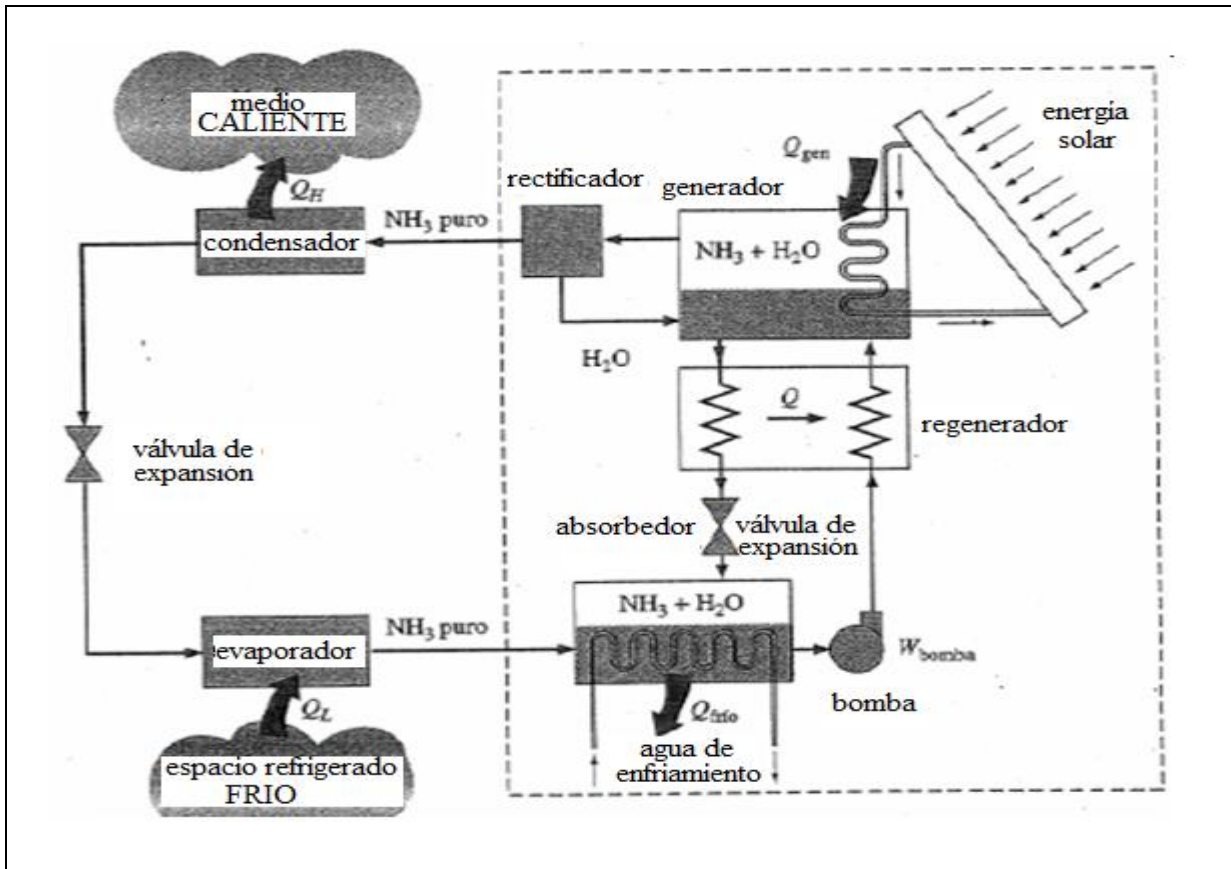
En unos cuantos años, las máquinas basadas en este principio se empezaron a construir en Estados Unidos de Norteamérica, principalmente para fabricar hielo y almacenar alimentos. Este sistema es muy similar al sistema por compresión de vapor, sólo que el compresor se ha sustituido por un complicado mecanismo de absorción compuesto por un absorbedor, una bomba, un generador, un regenera válvula y un rectificador.



Una vez que la presión del  $\text{NH}_3$  es elevada por los componentes en la caja (esto es lo único que tienen que hacer), se enfría y se condensa en el condensador, liberando calor hacia los alrededores; se estrangula hasta la presión del evaporador y absorbe calor del espacio refrigerado cuando fluye a través del evaporador. Así que no hay nada nuevo. Lo que sucede en la caja es lo siguiente:

- ⇒ El vapor de amoníaco sale del evaporador y entra al absorbedor, donde se disuelve y tiene una reacción química con el agua para formar  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$  esta es una reacción exotérmica; por ello el calor se libera durante este proceso.
- ⇒ La cantidad de  $\text{NH}_3$  que puede disolverse en  $\text{H}_2\text{O}$  es inversamente proporcional a la temperatura. Por lo consiguiente, es necesario enfriar el absorbedor para tener su temperatura lo más baja posible y, por ende, para maximizar, la cantidad de  $\text{NH}_3$  disuelto en el agua.
- ⇒ La solución líquida  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , que es rica en  $\text{NH}_3$ , se bombea luego al generador. El calor se transfiere a la solución de una fuente para evaporar algo de la solución.
- ⇒ El vapor que es rico en  $\text{NH}_3$  pasa por un rectificador, que separa el agua y la regresa al generador. El vapor de  $\text{NH}_3$  puro de alta presión continúa luego su trayecto por el resto del ciclo.
- ⇒ La solución caliente  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , pobre en  $\text{NH}_3$ , pasa después por un regenerador, donde transfiere algo de calor a la solución enriquecida que sale de la bomba, y se estrangula hasta la presión del absorbedor.

El ciclo de refrigeración por absorción de amoníaco, se muestra enseguida:



#### IV.4.2 Refrigeración por absorción vs refrigeración por compresión

Comparados con los sistemas por compresión de vapor, los sistemas de refrigeración por absorción presentan una ventaja importante: se comprime un líquido en vez de un vapor.

El trabajo del flujo permanente es proporcional al volumen específico, por lo que la entrada de trabajo en los sistemas de refrigeración por absorción es muy pequeña (del orden de 1% del calor suministrado al generador) y se ignora a menudo en el análisis del ciclo.

La operación de estos sistemas se basa en la transferencia de calor de una fuente externa. Por consiguiente, los sistemas de refrigeración por absorción son clasificados a menudo como sistemas accionados por calor.

Los sistemas de refrigeración por absorción son mucho más costosos que los sistemas de refrigeración por compresión de vapor. Son más complejos y ocupan más espacio, son mucho menos eficientes, por lo tanto requieren torres de enfriamiento mucho más grandes para liberar el calor residual, y son más difíciles de mantener dado que son poco comunes.

Así, los sistemas de refrigeración por absorción deberían considerarse sólo cuando el costo unitario de la energía térmica sea bajo y se proyecte permanecer bajo en comparación con la electricidad. Los sistemas de refrigeración por absorción se utilizan principalmente en grandes instalaciones comerciales e industriales.

El COP de sistemas de refrigeración por absorción se define como

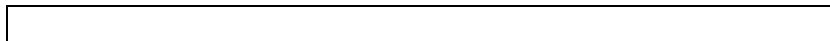
$$\text{COP}_{\text{absorción}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{Q_{\text{generador}} + W_{\text{bomba-entrada}}} = \frac{Q_L}{Q_{\text{generador}}}$$

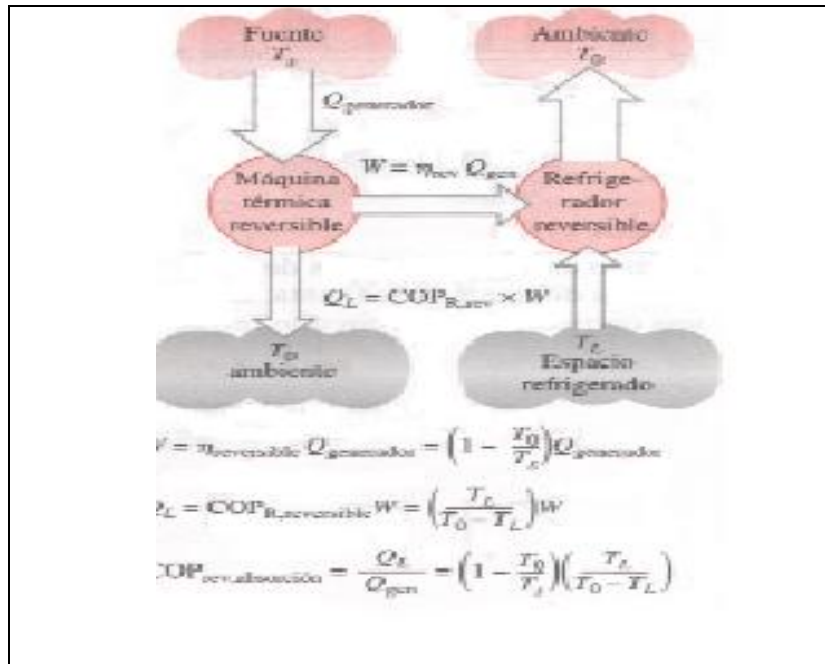
El COP máximo de un sistema de refrigeración por absorción se determina suponiendo que el ciclo completo es totalmente reversible (es decir, el ciclo no incluye irreversibilidades ni ninguna transferencia de calor debido a una diferencia de temperatura diferencial).

El sistema de refrigeración sería reversible si el calor de la fuente ( $Q_{\text{generador}}$ ) se transfiriera a una máquina térmica de Carnot y la salida de trabajo de esta máquina térmica ( $W = \eta_{\text{ter,rev}} Q_{\text{generador}}$ ) se suministrara a un refrigerador de Carnot para extraer calor de un espacio refrigerado. Observe que

$$\begin{aligned} Q_L &= W \times \text{COP}_{R,\text{rev}} \\ &= \eta_{\text{ter,rev}} Q_{\text{generador}} \times \text{COP}_{R,\text{rev}} \end{aligned}$$

Entonces, el COP total de un sistema de refrigeración por absorción en condiciones reversibles es la siguiente figura:





$$COP_{rev absorción} = \frac{Q_L}{Q_{gen}} = \eta_{rev} COP_{R,rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \left(\frac{T_s}{T_0 - T_L}\right)$$

donde  $T_L$ ,  $T_0$  y  $T_s$ , son las temperaturas termodinámicas del espacio refrigerado, el ambiente y la fuente de calor, respectivamente. Cualquier sistema de refrigeración por absorción que reciba calor de una fuente a  $T_s$ , y extraiga calor del espacio refrigerado a  $T_L$  mientras opera en un ambiente a  $T_0$  tendrá un COP menor que aquel determinado a partir de la ecuación anterior.

Por ejemplo, cuando la fuente está a  $120^\circ\text{C}$ , el espacio refrigerado está a  $-10^\circ\text{C}$  y el ambiente se encuentra a  $25^\circ\text{C}$ , el máximo COP que un sistema de refrigeración por absorción puede tener es 1.8. El COP de sistemas de refrigeración, por absorción reales por lo común es menor que 1.

Los sistemas de acondicionamiento de aire basados en la refrigeración por absorción, llamados enfriadores por absorción, se desempeñan mejor cuando la fuente de calor puede suministrar calor a una temperatura elevada con poca caída de temperatura.

Los enfriadores por absorción generalmente están nominados a una temperatura de entrada de  $116^\circ\text{C}$  ( $240^\circ\text{F}$ ). Los enfriadores funcionan a temperaturas más bajas, pero su capacidad

de enfriamiento disminuye sensiblemente con la disminución de la temperaturas de la fuente, aproximadamente 12.5 % por cada 6 °C de reducción en la temperatura de la fuente. Por ejemplo, la capacidad caerá a 50 % cuando la temperatura del agua de suministro baje a 93 °C. En este caso, uno necesita duplicar el tamaño (y por consiguiente los costos) del enfriador para lograr el mismo enfriamiento.

El COP del enfriador se ve menos afectado por descenso de la temperatura de la fuente. El COP cae un 25% por cada 6% de disminución de la temperatura de la fuente. El COP nominal de un enfriador por absorción de etapa sencilla a 116 °C es de 0.65 a 0.70. en consecuencia, por cada tonelada de refrigeración se requeriría una entrada de calor de  $(12\ 000\ \text{BTU/h}) / 0.65 = 18\ 460\ \text{BTU/h}$ . a una temperatura de 88 °C , el COP caera en 12.5 % y por lo tanto, la entrada de calor aumentara en 12.5% para el mismo efecto de enfriamiento.

En consecuencia se deben evaluar con cuidado los aspectos económicos antes de optar por cualquier sistema de refrigeración por absorción, de manera especial cuando la temperatura de la fuerza este por de bajo de los 93°C.

#### **IV.5 Ciclos de refrigeración por absorción**

Una vez vistos los conceptos necesarios, terminamos el capítulo marcando los ciclos continuos e intermitentes por absorción; así como sustancias que se emplean en este tipo de sistemas. En este sentido se tienen:

- ⇒ Ciclos continuos
- ⇒ Ciclos intermitentes

##### **IV.5.1 Ciclos continuos**

La mayor parte de los equipos de producción de frío, basados en el principio del ciclo de refrigeración por absorción, operan en ciclos continuos; es decir, el refrigerante circula de forma constante a través de cada uno de los equipos, sufriendo cambios de fase entre líquido y vapor, mezclándose o separándose de la solución absorbente-refrigerante; para finalmente regresar al estado inicial. Estos ciclos deben poseer un dispositivo de bombeo que garantice la circulación del fluido de trabajo por todo el sistema, lo que implica en la mayoría de los casos, un consumo de energía eléctrica para accionar la bomba.



### **IV.5.2 Ciclos intermitentes**

Los ciclos intermitentes están principalmente relacionados con sistemas sólido-gas; esto es debido a la dificultad mecánica asociada al transporte del sólido de un equipo a otro. Sin embargo, también se presenta en sistemas de absorción líquido-gas en donde no se desea la utilización de una bomba mecánica. En ciclos intermitentes el absorbedor y el generador son el mismo, e intercambian sus funciones de forma periódica.

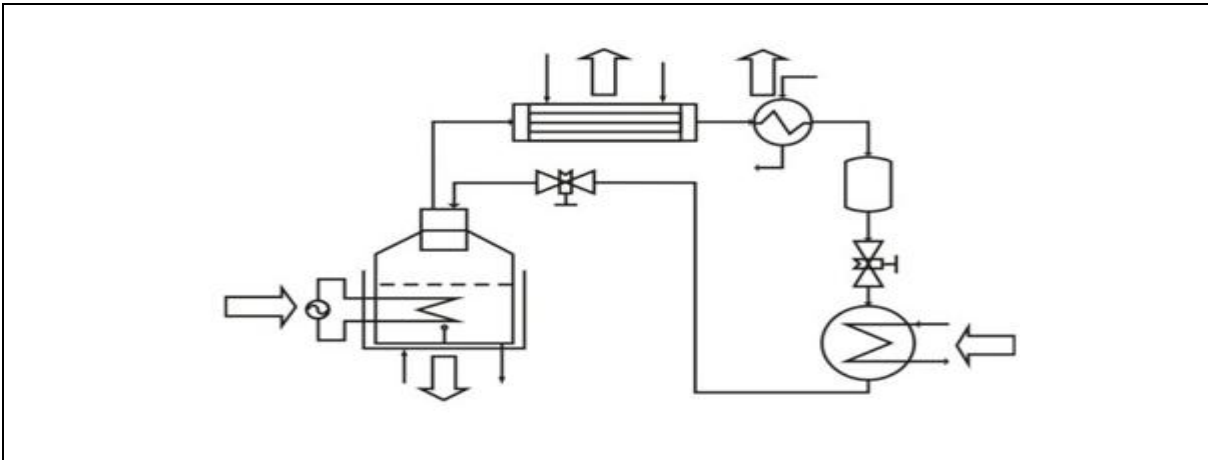
En el ciclo intermitente el período de generación-condensación del refrigerante y el período de evaporación-absorción se efectúan en tiempos diferentes.

En un primer tiempo la solución concentrada contenida en el generador, se calienta provocando la separación de los vapores del refrigerante, liberando el refrigerante a alta presión sin necesidad de bombas o compresores, posteriormente el refrigerante puro continua hacia el condensador en donde se licua y se almacena en un recipiente de condensados.

En otro tiempo, se deja enfriar la solución diluida que quedó en el generador hasta que alcance la presión y la temperatura necesarias para que el refrigerante sea absorbido por la solución diluida. Una vez logrado lo anterior se hace pasar el refrigerante líquido a través de una válvula de expansión hacia el evaporador, en donde se procede a su vaporización a baja presión, produciendo una baja temperatura.

El refrigerante en forma de vapor regresa al generador que ahora tiene la función de absorbedor y es re-absorbido, para iniciar un nuevo ciclo.

En la figura siguiente se presenta un esquema propuesto de la configuración del sistema de refrigeración por absorción en un ciclo intermitente.



En el generador, también llamado reactor, existe una relación de equilibrio de fases que gobierna los fenómenos de reacción químico-física, transferencia de calor, presión y temperatura de operación.

Gracias a esta característica, estos sistemas son mucho más simples y pueden operar sin necesidad de bombas para la circulación del fluido de trabajo, por lo tanto están libres de los requerimientos de energía eléctrica.

Sin embargo, la eficiencia en los ciclos intermitentes puede ser menor a la de los ciclos continuos, debido a los requerimientos energéticos necesarios para calentar y enfriar en generador-absorbedor en cada uno de los tiempos de proceso.

La configuración del dispositivo experimental propuesta en la figura del ciclo continuo, puede ser usada para evaluar sistemas de adsorción sólido-gas, muy semejantes en concepto a los sistemas de absorción, salvo por la diferencia básica de que la operación entre el sólido y el gas es una adsorción (enlace físico). El efecto térmico se debe a la  $H$  de adsorción.

Al igual que en todos los sistemas por absorción, existe una relación de equilibrio de fases que gobierna los fenómenos de adsorción, transferencia de calor, presión y temperatura de operación. La unidad básica del proceso consiste en un recipiente en el cual se lleva a cabo la adsorción sólido/gas, los cuales se llaman “adsorbente” para el sólido y “adsorbato” para el refrigerante



### **IV.5.3 Sustancias utilizadas**

En la refrigeración por absorción se tienen dos componentes: el refrigerante y el absorbente, los cuales a las presiones y temperaturas utilizadas en el ciclo de refrigeración, coexisten tanto en la fase vapor como líquida como vapor y sólida. Existe una gran posibilidad de combinaciones posibles entre el refrigerante y el absorbente que se pueden usar en la industria del frío.

La evaporación del refrigerante a partir de una solución líquida se puede remplazar por evaporación a partir de una fase sólida. Ante tal diversidad de posibilidades existe la dificultad de hacer una selección apropiada. Por lo general se consideran las cualidades fisiológicas, toxicidad, detección en caso de fugas, influencia sobre los productos a enfriar y naturalmente el precio. Sin embargo, la estabilidad química de estos dos componentes puede ser un factor importante.

El par comúnmente usado, y sobre lo que se ha estudiado ampliamente y mayor información se posee, es el amoníaco-agua y el bromuro de litio-agua. Sin embargo, otros pares son considerados porque en ciertos casos se requieren condiciones de operación, de construcción y técnicas, entre otras; que no es posible obtener con los sistemas convencionales.

En la tabla siguiente, se presentan los principales pares refrigerantes usados en diferentes tecnologías de absorción, donde se incluyen además las temperaturas típicas de generación y evaporación, lo que permite tener una idea aproximada de la fuente de energía adecuada y su aplicación.

<b>Sustancias de trabajo comunes en sistemas de absorción y adsorción</b>				
<b>Refrigerante</b>	<b>Absorbente</b>		<b>Temperatura (°C)</b>	
<b>Absorción gas- líquido</b>			<b>Evaporación</b>	<b>Generación</b>
Amoníaco	Agua NaSCN LiNO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub> KBr	<0	120 – 200
Agua	LiBr, LiCl		>0	80 – 200
Monometilamina	Agua		>0	60 – 150

<b>Sustancias de trabajo comunes en sistemas de absorción y adsorción</b>				
<b>Refrigerante</b>	<b>Absorbente</b>		<b>Temperatura (°C)</b>	
Absorción gas- sólido			Evaporación	Generación
Amoniaco	MnCl <sub>2</sub> SrBr <sub>2</sub> CdCl <sub>2</sub> CaCl <sub>2</sub> SrCl <sub>2</sub> ZnCl <sub>2</sub> CuCl <sub>2</sub> SnCl <sub>2</sub>	PbCl <sub>2</sub> LiCl <sub>2</sub> BaCl <sub>2</sub> FeCl <sub>2</sub> CoCl <sub>2</sub> NiCl <sub>2</sub> MgCl <sub>2</sub>	<0	120 – 150
Monometilamina	Lic., CaCl <sub>2</sub>		>0	60 - 150

<b>Sustancias de trabajo comunes en sistemas de absorción y adsorción</b>				
<b>Refrigerante</b>	<b>Absorbente</b>		<b>Temperatura (°C)</b>	
Adsorción gas- sólido			Evaporación	Generación
Amoniaco	Zeolita		<0	120 – 200
Agua	Zeolita, Alumina, Sílica gel		>0	70 – 150
Metanol	Zeolita, Carbón activado		>0	70 – 150
Hidrógeno	MHHP		>0	60 - 200

#### **IV.4.4 Rendimiento de los sistemas de refrigeración por absorción**

El rendimiento de un sistema de refrigeración por absorción está estrechamente relacionado con las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo. Para el caso de los sistemas de absorción líquido-gas, un requerimiento fundamental de la combinación del absorbente-refrigerante es que en la fase líquida, estos deben poseer un margen de solubilidad en el rango de operación del ciclo.

La mezcla debe ser químicamente estable, no tóxica y no explosiva. A continuación se listan las características adicionales más deseables:

- ⇒ La diferencia entre el punto de ebullición del refrigerante puro y el de la mezcla a la misma presión, debe ser lo más grande posible.
- ⇒ El refrigerante debe poseer un alto calor de vaporización y alta relación de concentración en el absorbente, con el fin de mantener una baja rata de

circulación entre el generador y el absorbedor por unidad de capacidad de enfriamiento.

- ⇒ El absorbente debe ser menos volátil que el refrigerante, para facilitar su separación en el generador. Si esto no es posible, se requerirá la integración de un rectificador para llevar a cabo esta separación en forma de vapor.
- ⇒ Las propiedades de transporte relacionadas con la transferencia de masa y calor, tales como viscosidad, conductividad térmica y coeficiente de difusión deben ser favorables.
- ⇒ Tanto el refrigerante como el absorbente no deben ser corrosivos, ambientalmente amigables y de bajo costo.

Muchos fluidos de trabajo han sido sugeridos en la literatura especializada, se estima en más de 40 compuestos de refrigerantes y alrededor de 200 compuestos de absorbentes disponibles.

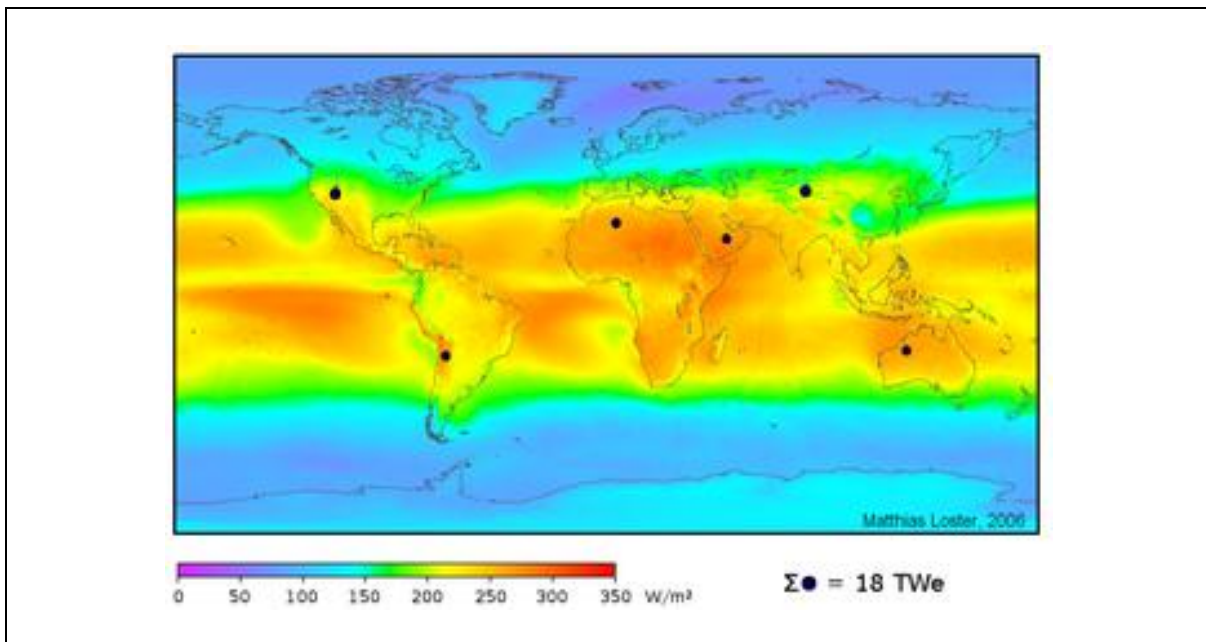
Al revisar las características que debe reunir la mezcla ideal, se observa que es difícil encontrar un par que reúna las propiedades deseables, y por ello, resulta práctico optimizar la selección en función de las condiciones de operación (calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, etcétera), así como de la ubicación del equipo (industrial, residencial, etcétera).

## CAPITULO V: REFRIGERACIÓN SOLAR

### V.1 Introducción

La disponibilidad de los recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico en todo el mundo. Consecuentemente, el desarrollo tecnológico determina la utilización de ciertos tipos de energía y, por lo tanto, la disponibilidad de este recurso.

Los recursos energéticos son usados por el hombre para satisfacer algunas de sus necesidades básicas. El recurso energético renovable más confiable es el Sol, que da a la Tierra innumerable cantidad de energía que puede ser aprovechable en beneficio de la sociedad



Para los fines del aprovechamiento de su energía, el Sol es una inmensa esfera de gases que se encuentran a una altísima temperatura, con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  metros, situado a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  metros respecto de la Tierra. A esta distancia se le conoce como unidad astronómica.

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de los  $10^7$  K, pero en la fotosfera (la superficie externa del Sol) la temperatura efectiva de cuerpo negro es de 5762 K. Por supuesto, existen numerosas formas de calcular la temperatura del Sol y, desafortunadamente, cada método obtiene un valor diferente. Es claro, sin embargo, que nadie le ha colocado un termómetro al sol.

Algunos datos a tomar en cuenta son:

- ⇒ El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión que se llevan a cabo en su núcleo. La generación de energía proviene de la pérdida de masa del sol, que se convierte en energía de acuerdo a la famosa ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

en donde:

E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m;  
c es la velocidad de la luz.

- ⇒ El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro, que corresponde al 15% del volumen; contiene el 40% de la masa y es ahí en donde se genera el 90% de la energía.
- ⇒ La zona que va del 70% al 100% del radio solar, se conoce como zona convectiva. La capa externa de esta región recibe el nombre de fotosfera y es considerada como la superficie del sol, por ser ésta una región opaca, de donde se emite la mayoría de la radiación solar hacia el espacio.

La fotosfera es la superficie aparente del Sol cuando se observa con un filtro adecuado. Por ser opaca, esta capa impide observar el interior del Sol. Sin embargo, como todo el Sol (desde el núcleo hasta la superficie) se encuentra formado por gases, no hay una superficie claramente definida, como la hay en la Tierra

Sobre la fotosfera existen también gases, prácticamente transparentes, los cuales reciben el nombre de corona solar, observable durante los eclipses totales de Sol. La corona solar es la atmósfera del Sol.

## **V.2 La energía solar**

La energía que procede del Sol es fuente directa o indirecta de casi toda la energía que utilizamos:

- ⇒ Los combustibles fósiles existen gracias a la fotosíntesis, que convirtió la radiación solar en las plantas y animales de las que se formaron el carbón, el gas y el petróleo.
- ⇒ El ciclo del agua que nos permite obtener energía hidroeléctrica, es movido por la energía solar que evapora el agua, forma nubes y las lleva tierra adentro, donde caerá en forma de nieve o lluvia.
- ⇒ El viento se forma cuando unas zonas de la atmósfera son calentadas por el Sol en mayor medida que otras.

## **V.3 Aprovechamiento de la energía solar**

El sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre, es limpia, abundante y está disponible en la mayor parte de la superficie terrestre y puede por lo tanto, liberarlo de los problemas ambientales generados por los combustibles convencionales como el petróleo y de otras alternativas energéticas como las centrales nucleares.

Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos de las últimas décadas el aprovechamiento de esta opción ha sido insignificante, comparándolo con el consumo global de energía en el mundo.

El aprovechamiento directo de la energía solar, se hace de diferentes formas:

- ⇒ Calentamiento directo de locales por el Sol
- ⇒ Acumulación del calor solar
- ⇒ Generación de electricidad

Los posibles usos de la energía solar, se pueden listar como sigue:

- ⇒ Calefacción doméstica
- ⇒ Refrigeración
- ⇒ Calentamiento de agua
- ⇒ Destilación
- ⇒ Generación de energía
- ⇒ Fotosíntesis
- ⇒ Hornos solares
- ⇒ Cocinas
- ⇒ Evaporación
- ⇒ Acondicionamiento de aire
- ⇒ Control de heladas
- ⇒ Secado

Se han ensayado todos los usos citados de la energía solar en escala de laboratorio, pero no se han llevado a la escala industrial. En muchos casos, el costo de la realización de estas operaciones con energía solar no pueden competir con el costo cuando se usan otras fuentes de energía por la gran inversión inicial que es necesaria para que funcionen con energía solar y por ello la mayor parte de los estudios de los problemas de utilización de esta energía está relacionado con problemas económicos.

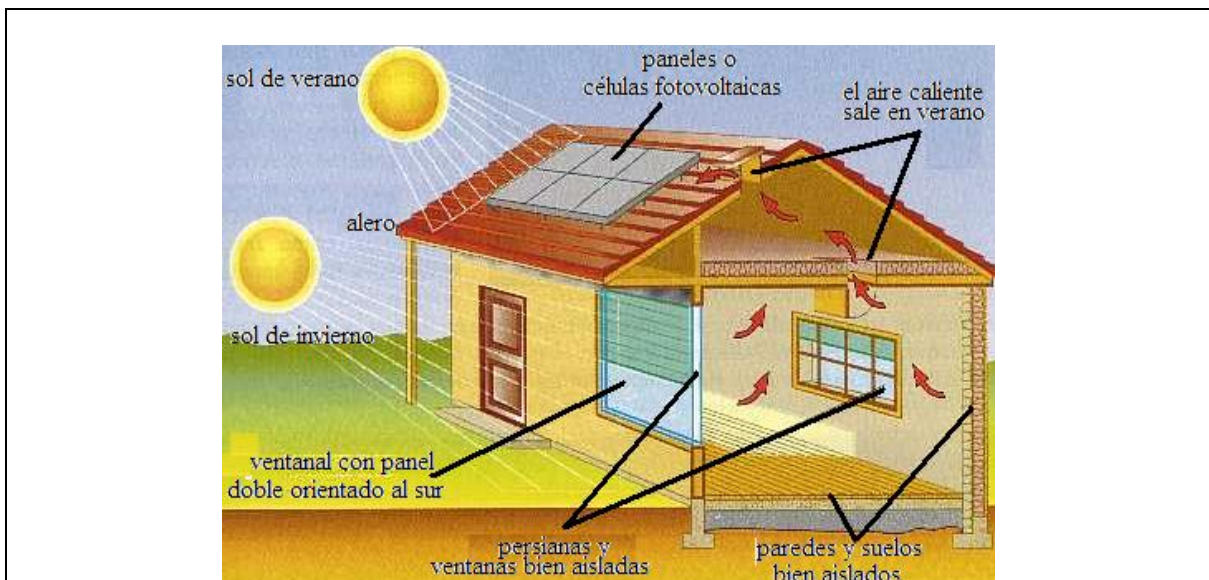
Las instalaciones solares pueden considerarse clasificadas por tres tipos de aplicación.

- ⇒ Primero: hornos solares, usados como medio de laboratorio para obtener altas temperaturas en diversos estudios y propuestos para usos semiindustriales.
- ⇒ Segundo: los usos potenciales de disposiciones solares sencillas, como cocinas, refrigerantes y bombas de irrigación en regiones no industrializadas, con radiación segura y en donde los actuales recursos de energía no son satisfactorios o resulten caros.
- ⇒ Un tercer grupo de aplicación de energía solar podrá competir en el futuro económicamente con otras fuentes de energía en algunas zonas de países industrializados, como los EE.UU., si los adelantos técnicos en este campo o los cambios en el costo de la energía de otras fuentes llegan a alterar su costo relativo.

Los problemas con que se tropieza para recoger la energía solar, almacenarla y usar la energía resultante, son los mismos para numerosos usos potenciales de esta fuente de energía.

### **V.3.1 Calentamiento directo de locales por el Sol**

En invernaderos, viviendas y otros locales, se provecha el Sol para calentar el ambiente. Algunos diseños arquitectónicos buscan aprovechar al máximo este efecto y controlarlo para poder restringir el uso de calefacción o de aire acondicionado.

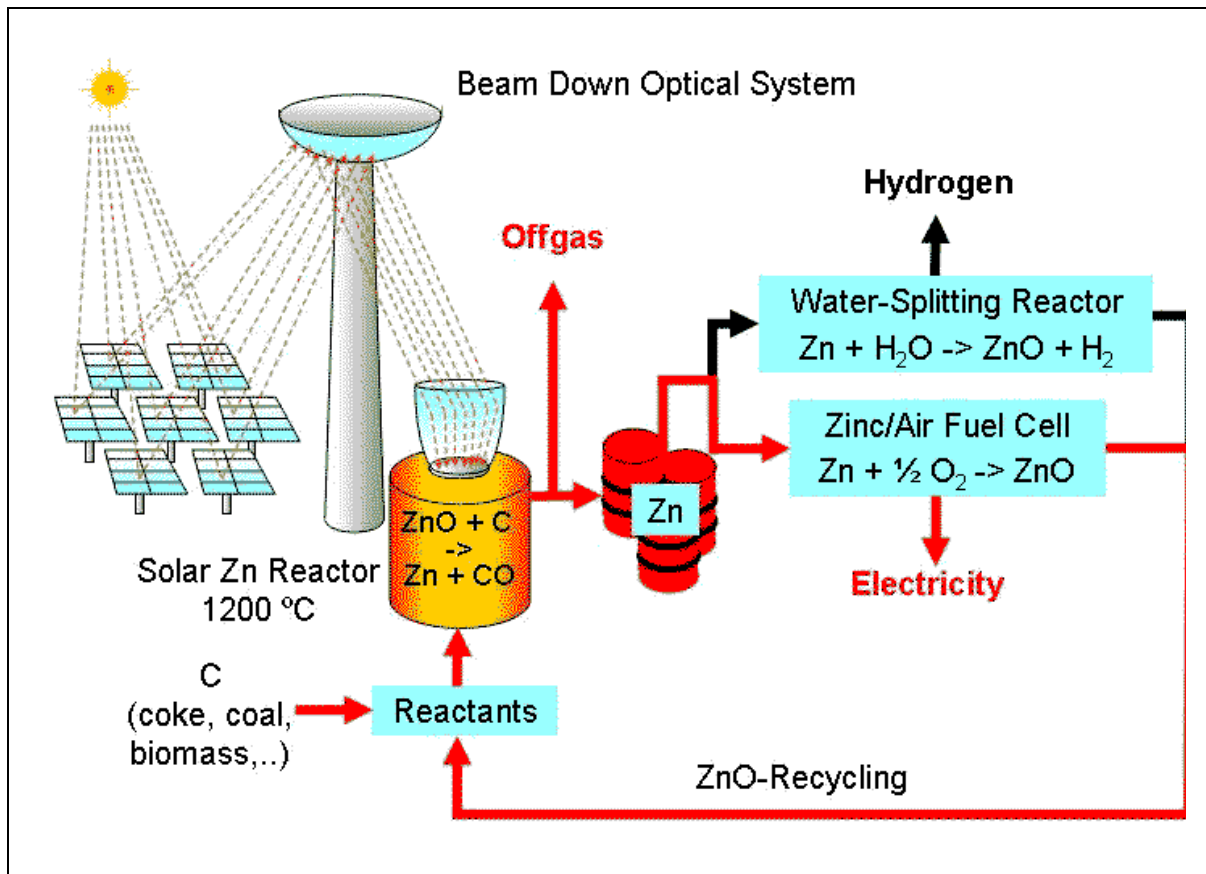


### **V.3.2 Acumulación del calor solar**

Se hace con paneles o estructuras especiales colocadas en lugares expuestos al Sol, como los tejados de las viviendas, en los que se calienta algún fluido que almacena el calor en depósitos.

Se utiliza, sobre todo, para calentar agua y puede suponer un importante ahorro energético si se toma en cuenta que en un país desarrollado más del 5% de la energía consumida se usa para calentar agua.



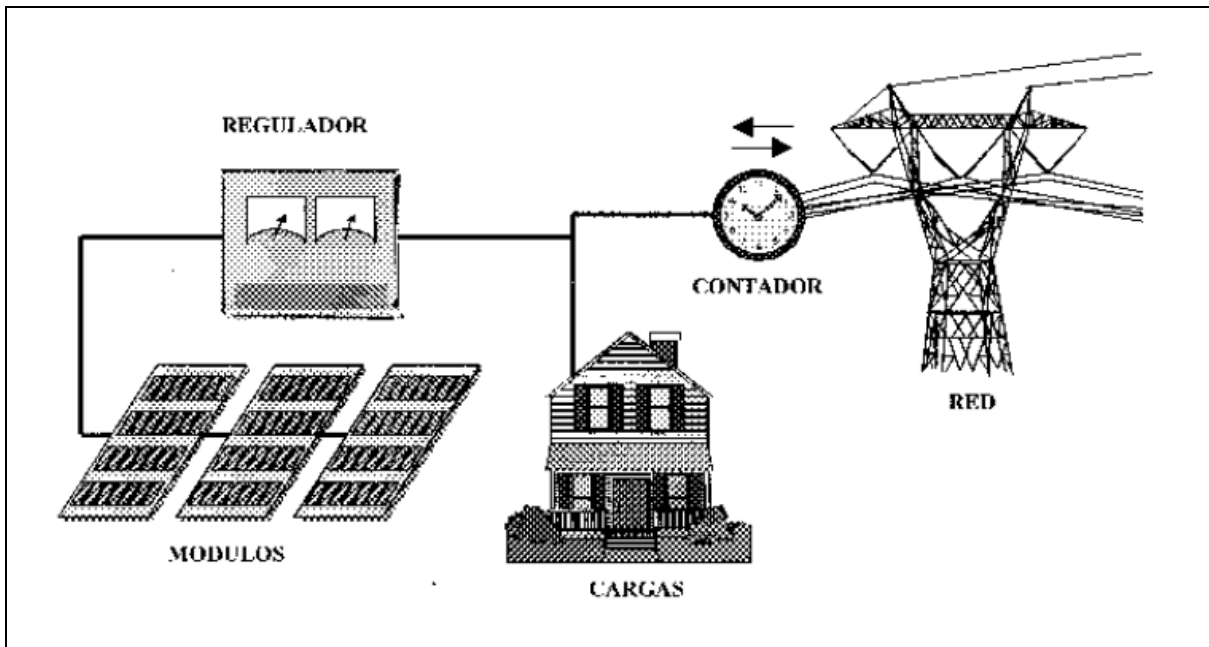


### V.3.3 Generación de electricidad

Se puede generar energía a partir de la energía solar, por varios procedimientos:

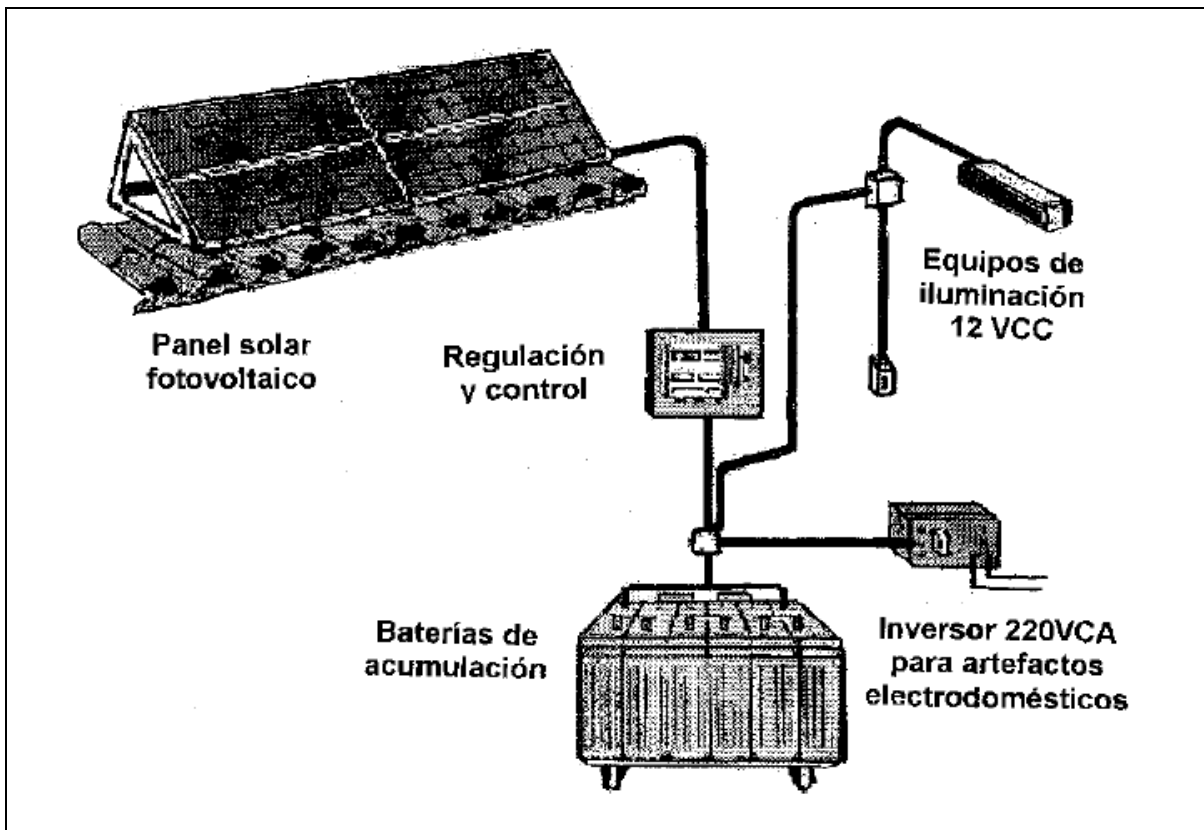
- ⇒ En el sistema termal, la energía solar se utiliza para convertir agua en vapor en dispositivos especiales. En algunos casos se utilizan espejos cóncavos que concentran el calor sobre tubos que contienen aceite. El aceite alcanza temperaturas de varios cientos de grados y con él, se calienta agua hasta ebullición. Con el vapor se genera electricidad en turbinas clásicas. Con algunos dispositivos de éstos, se consiguen rendimientos de conversión de energía del orden del 20% de la energía calorífica que llega a los colectores.

⇒ La luz del sol se puede convertir directamente en electricidad utilizando el efecto fotoeléctrico. Las células fotovoltaicas no tienen rendimientos muy altos. La eficiencia media en la actualidad es de un 10% y un 15%, aunque algunos prototipos experimentales logran eficiencias de hasta el 30%. Por eso, se necesitan grandes extensiones si se requiere si se quiere producir energía en grandes cantidades.



Uno de los problemas de la electricidad generada con el Sol es que sólo se puede producir en el día y es difícil y costoso su almacenamiento.

Para intentar solucionar este problema se están investigando diferentes tecnologías. Una de ellas usa la electricidad para disociar el agua, por electrólisis, en hidrógeno y oxígeno. Después, el hidrógeno se utiliza como combustible para regenerar agua, produciendo energía por la noche.



#### V.4 Refrigeración con energía solar

El tema de la refrigeración solar tiene varios propósitos, pero en general lo podemos resumir como la producción de bajas temperaturas utilizando como fuente de energía al sol.

De hecho, podría decirse que prácticamente todos los sistemas de refrigeración que existen son sistemas solares porque un refrigerador doméstico que produce frío se conecta a la toma de corriente y la electricidad proviene de plantas termoeléctricas, plantas hidroeléctricas o combustibles que se producen en las plantas termoeléctricas en las que la energía solar se acumula a través de millones de años.

Desde luego a lo que nos referimos en este escrito es a situaciones un poco más directas. Podría decirse que hay dos campos de la refrigeración solar:

⇒ El acondicionamiento de aire utilizando energía solar

⇒ La utilización de la arquitectura bioclimática para producir acondicionamiento ambiental utilizando de manera directa e indirecta la energía solar.

La arquitectura solar es una forma de refrigeración que utiliza el diseño estructural, los materiales y procesos como la evaporación del agua en forma directa e indirecta a través de las plantas, además de usar conceptos como la radiación nocturna; entonces se tiene que todos estos factores son elementos que se pueden combinar de manera inteligente en una edificación para poder provocar enfriamiento del lugar y desde luego una mejor climatización dentro del edificio.

Estos sistemas son catalogados como pasivos, en el sentido que no hay nada en movimiento, todos son elementos que están quietos pero que actúan a ciertos principios de la termodinámica y es el resultado de obtener una temperatura de la edificación agradable.

En contraste con los métodos pasivos, existen los sistemas activos que funcionan básicamente con energía solar.

#### **V.4.1 Sistemas activos de refrigeración solar fotovoltaicos**

Cada vez más se utilizan sistemas de refrigeración fotovoltaico que consisten en una tecnología que transforma la radiación solar en electricidad.

En un panel fotovoltaico que produce electricidad lo que se hace es acoplar a un refrigerador por compresión mecánica común y corriente una fuente de energía en la cual se produce electricidad que se suministra al sistema de refrigeración y con ello se tiene un sistema de refrigeración casi solar en un sentido no estricto pero que es considerado como un sistema de refrigeración solar importante.

Hay algunos sistemas alternativos que son utilizados en escalas pequeñas como hieleras que utilizan el mismo principio de la generación con energía fotovoltaica y que producen refrigeración a través de otros sistemas como es el efecto Thomson.

##### **V.4.1.1 Sistemas fotovoltaicos**

Los sistemas fotovoltaicos son sistemas de compresión mecánica de vapor con motor de C.A o C.D. También pueden ser sistemas termoeléctricos o sistemas no comerciales.

#### **V.4.1.2 Refrigeración fotovoltaica**

Los pocos refrigeradores producidos especialmente para PV son caros por el bajo volumen de ventas (pago de aranceles en muchos casos). Tienen proyectado a futuro, un aislamiento al vacío.

Se requieren refrigeradores más grandes para la elaboración y conservación de lácteos, pescado y carne.

#### **V.4.1.3 Refrigerador fotovoltaico Sun Danzer**

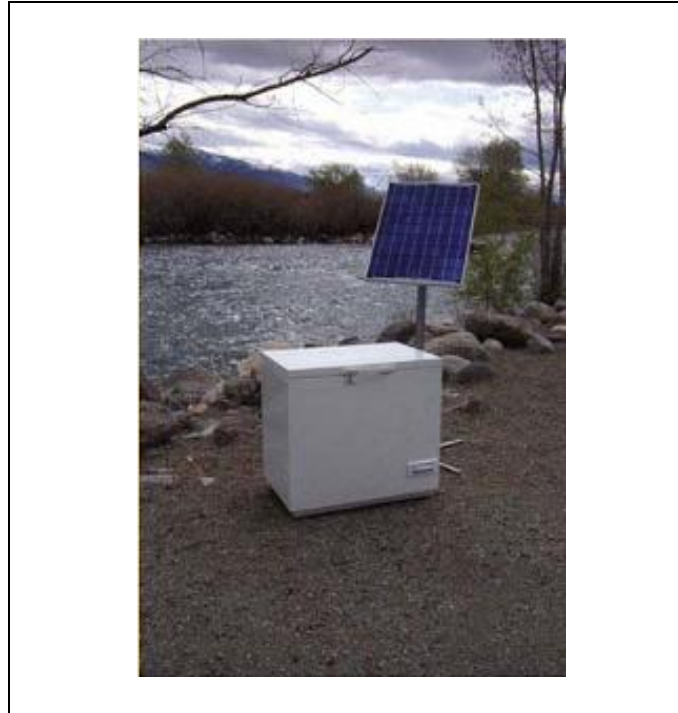
El refrigerador Sun Danzer es un sistema de refrigeración fotovoltaico y no comercial; sus especificaciones son las siguientes:

Requerimientos de energía: 90 a 150 Wp
Voltaje: 12 VDC
No requiere baterías
Reserva térmica: 7 días 29 °C
Insolación solar mínima: 4 horas sol/día
Refrigerante 134a
Aislante 110 mm poliuretano
Capacidad: 105 litros
Dimensiones en cm: 102 x 76 x 94
Costo: \$1200 dólares + paneles fotovoltaicos

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo V: Refrigeración solar

Y su forma física es como sigue:



En países como Cuba, la refrigeración fotovoltaica es muy común. Se utiliza un refrigerador comercial de corriente alterna. Requiere, además de los paneles fotovoltaicos, de un regulador de carga, inversor y baterías. Se puede observar en la siguiente figura:



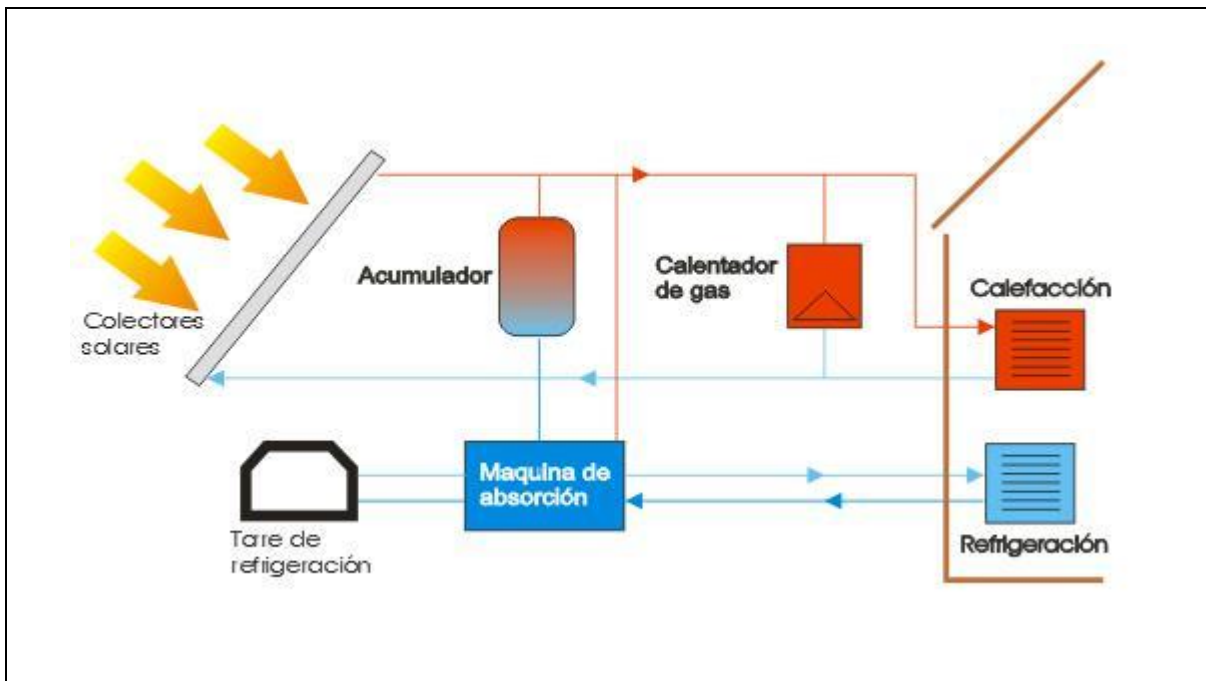
**V.4.2 Absorción, Adsorción y Eyecto compresión**

Otro tipo de método se puede clasificar como:

- ⇒ Sistemas por absorción
- ⇒ Sistemas por adsorción
- ⇒ Sistemas por eyecto compresión

Estos tres son sistemas de refrigeración alternativos a la compresión mecánica y pueden utilizar al Sol como fuente de energía.

Cualquiera de estos tres sistemas: absorción, adsorción y eyecto compresión, tienen un principio filosófico único que es el reemplazar el compresor mecánico que requiere de grandes cantidades de electricidad por un conjunto de elementos que van a hacer la misma función que el compresor mecánico, sólo que van a utilizar una pequeña cantidad de electricidad y van a utilizar mucha energía calorífica. Esa energía calorífica se va a tomar del sol.



Actualmente dentro de los sistemas de refrigeración o sistemas de acondicionamiento de aire solar, los más destacados son los que tienen una aplicación comercial importante; los que se venden comercialmente desde hace ya muchos años (sistemas de refrigeración por absorción) y un poco menos los de adsorción y todavía menos los de efecto compresión, es decir, el mercado más importante ha sido los sistemas de absorción de vapor.

Esta demanda se debe al desarrollo tecnológico que han tendido estos sistemas dentro del crecimiento de la tecnología, logrando mejores resultados con los sistemas por absorción, tanto para producción de aire acondicionado y generación de hielo, que es otra manera de poder acondicionar o de obtener hielo para todo lo que es la cadena alimenticia, y han tenido una mejor aceptación por parte de las compañías industriales que los llegan a fabricar.

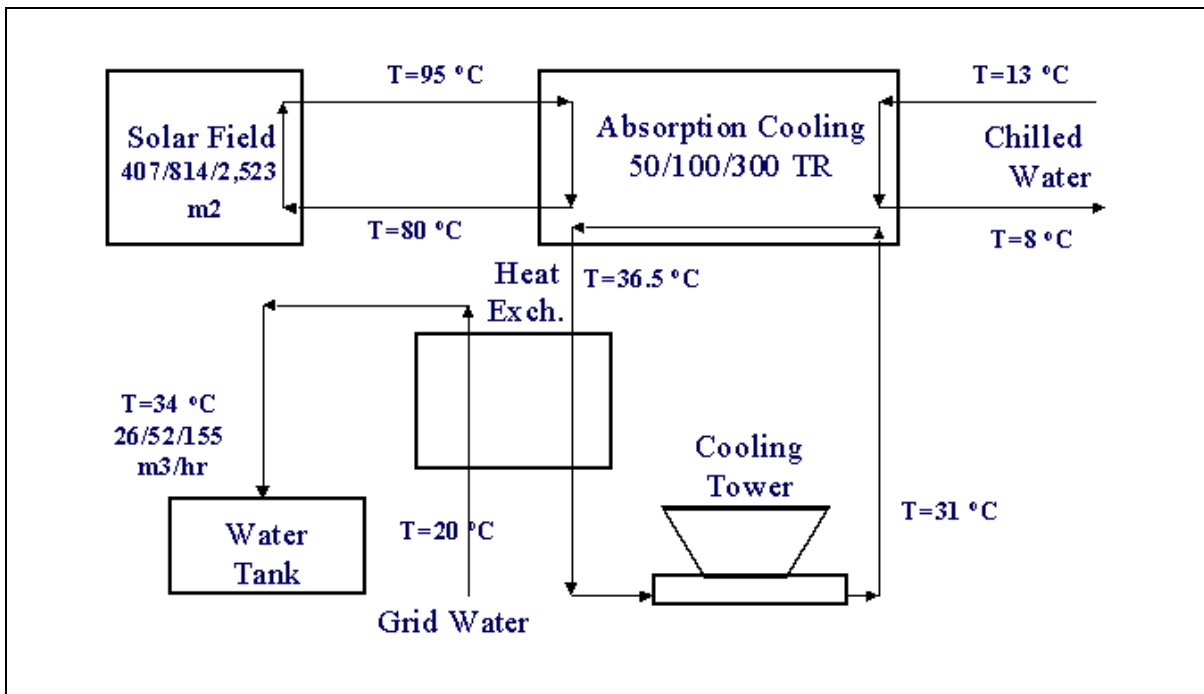
Básicamente ha sido por los mejores resultados pero los otros dos sistemas tanto de adsorción como de efecto compresión, vienen siendo desarrollados y en algunos años van a ser tan competitivos o más que los métodos por absorción, pero lo que es importante es que existirán, al menos, tres diferentes tecnologías y una cuarta con la fotovoltaica, las cuales pueden ser alternativas muy interesantes para llegar a tener acondicionamiento de aire.

Aunando a esto, la bioclimática que suma cinco tecnologías para tener acondicionamiento ambiental en las edificaciones, utiliza básicamente un surtidor de energía como es el Sol que es una fuente prácticamente gratuita.

Con eso, se evitaría que muchas edificaciones tuvieran que consumir grandes cantidades de electricidad y más que todo tuvieran la posibilidad de captar energía solar haciéndolo de manera muy sencilla utilizando los techos de las casas, de las edificaciones y con eso hacer funcionar los sistemas.

El desarrollo del ciclo de refrigeración por absorción, puede utilizar energía solar pero también podría usar otra fuente de poder como es el gas y el diesel; ya que de lo que se trata es tener una fuente de calor.





Son sistemas ya muy antiguos, particularmente hablando de la absorción donde se utilizan combustibles fósiles en procedimientos grandes. Por ejemplo, la torre de Pemex requiere de climatización, por lo que hay semanas y meses del año en que tienen problemas de altas temperaturas en el interior, entonces necesitan tener aire acondicionado.

En este caso los sistemas utilizados son por absorción, por lo que requieren de una fuente de calor de gas natural, el cual es quemado produciendo vapor que sirve para hacer funcionar los ciclos por absorción.

### **V.5 Sistemas de refrigeración solar**

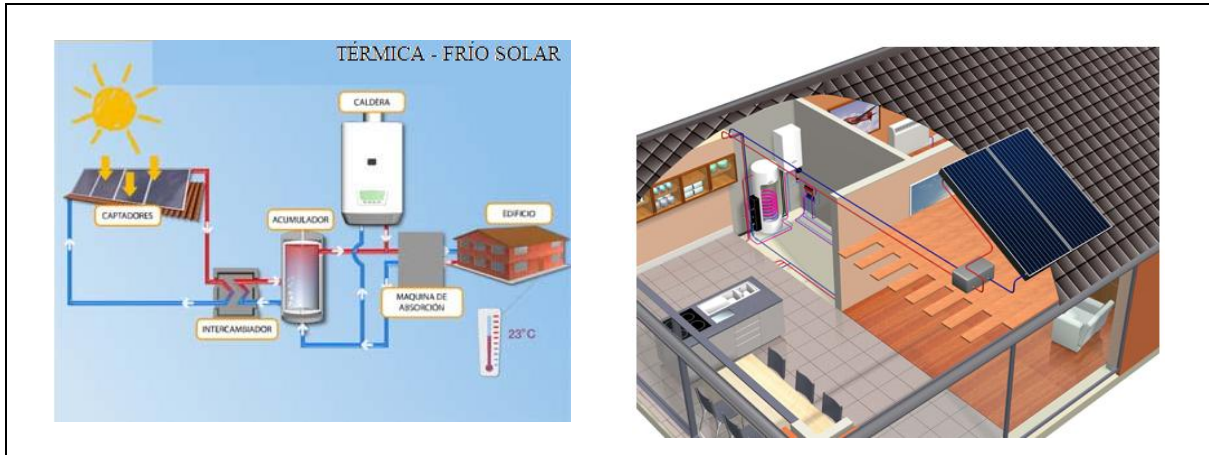
En los últimos años se ha producido un evidente crecimiento de las necesidades de refrigeración en los edificios, tanto por una mayor exigencia de las condiciones de confort, como por un aumento de las cargas térmicas.

Habitualmente, la demanda de refrigeración es cubierta por la electricidad, lo que provoca puntas de consumo considerables en las redes de distribución eléctrica durante los meses de verano. No obstante, existen tecnologías para refrigerar accionadas por fuentes térmicas, como la energía solar.

# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

## Capítulo V: Refrigeración solar

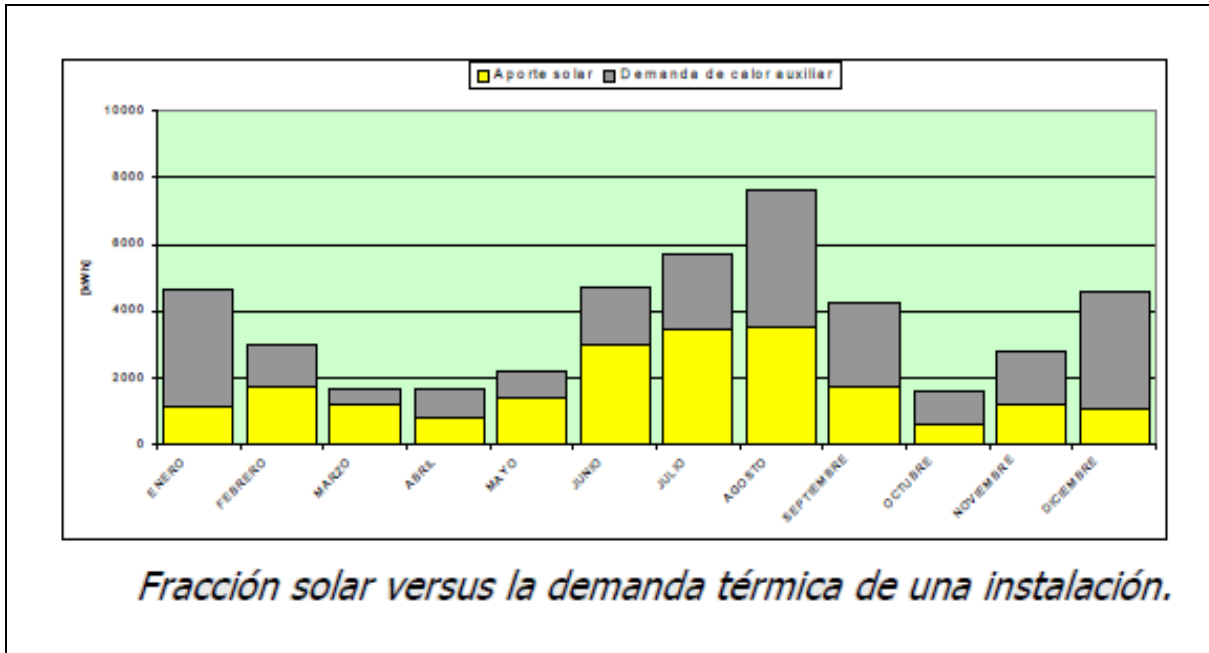
Un sistema de refrigeración solar ofrece, además de las ventajas propias del uso de una fuente de energía renovable, la coincidencia entre la máxima demanda y la máxima producción (máxima radiación solar). Este tipo de sistema es adecuado para edificios del sector terciario, con demanda intensiva de refrigeración y de calefacción, tales como: hoteles, oficinas o centros comerciales.



En Europa, como claro ejemplo, está reapareciendo la tendencia a aplicar sistemas de refrigeración accionados mediante energía solar térmica debido a diferentes motivos; entre los que destacan:

- ⇒ La búsqueda de refrigerantes alternativos a los CFC o HCFC.
- ⇒ La existencia de un mercado de energía solar térmica.

Las tecnologías de refrigeración que se pueden acoplar a un sistema solar son las máquinas enfriadoras térmicas; sean éstas de absorción o de adsorción, así como los procesos de desecación y enfriamiento evaporativo. La demanda térmica de una instalación con estas características se muestra en la siguiente figura:



### **V.5.1 Refrigeración solar con máquinas enfriadoras térmicas: absorción y adsorción**

Las máquinas de absorción son equipos habituales del mercado de refrigeración. Su funcionamiento se basa en las reacciones físico-químicas entre un refrigerante y un absorbente. Son accionadas por una energía térmica, que en la aplicación de la energía solar es agua caliente. El tipo de captadores óptimos son los planos selectivos, de concentrador o de vacío.

Un ejemplo de captadores solares de refrigeración solar, se muestra en la figura siguiente:



*Campo de captadores solares de una instalación de refrigeración solar.  
Guetermann-Polygal – Cuernavaca - México*

Las máquinas de absorción más aplicadas en climatización son las de bromuro de litio (absorbente) y agua (refrigerante). Estas máquinas tienen un COP (frío producido/energía consumida) de 0.6 – 0.7 y pueden funcionar con agua caliente a partir de 80° C.

En las máquinas de adsorción, a diferencia de las anteriores, en vez de una absorbente (líquido), se utiliza un adsorbente (sólido). Además, el ciclo de funcionamiento no es continuo, sino que tiene una fase de carga y una de descarga.

El COP de estas máquinas se encuentra entre 0.55 y 0.65 y la temperatura de la fuente caliente puede ser inferior a las de las máquinas de adsorción. Esto permite el uso de captadores planos. Un ejemplo de ellas se puede observar en la figura siguiente:



*Unidad de enfriamiento. Máquina de adsorción.  
Guetermann-Polygal – Cuernavaca - México*

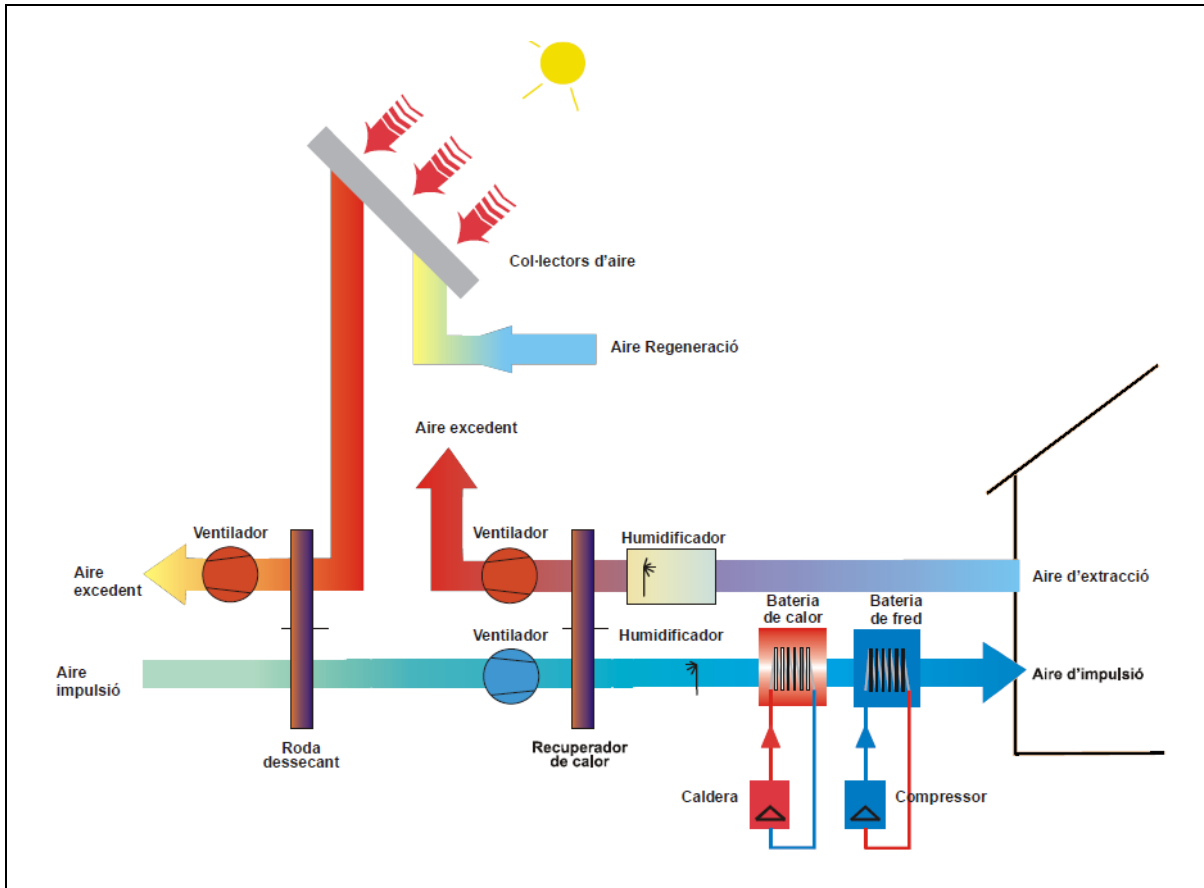
### **V.5.2 Refrigeración solar mediante desecación y refrigeración evaporativa**

Este sistema consiste en un ciclo en el que el aire a climatizar es primeramente secado y después enfriado por humidificación.

Trata por separado la carga latente y sensible, hecho que permite un control muy preciso de las condiciones de comodidad.

Se utiliza la energía solar a baja temperatura (entre los 45° C y los 60° C) para regererar el equipo principal, que es una rueda desecante. Esta rueda gira lentamente adsorbiendo el agua contenida en la corriente de aire.

La regeneración consiste en evaporar el agua para mantener la capacidad desecante del material.



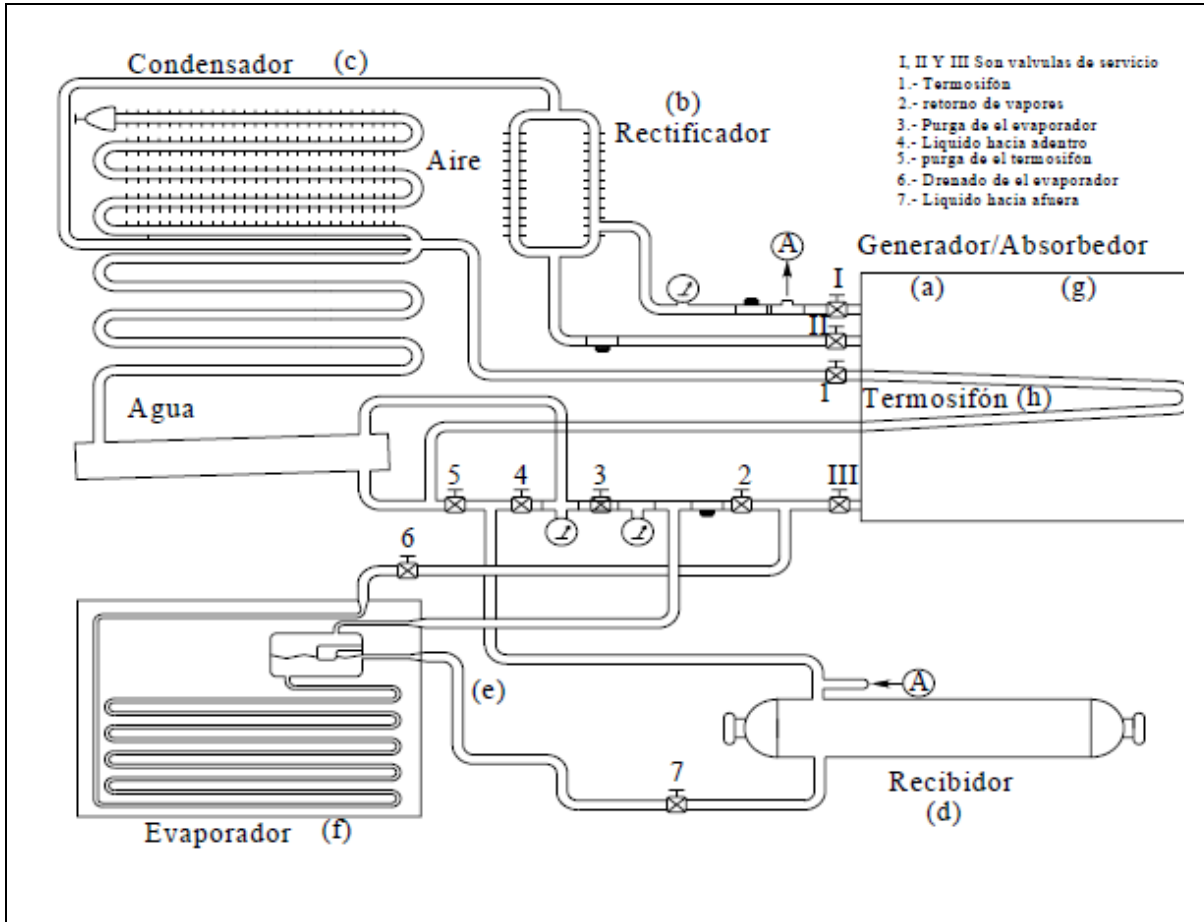
Los sistemas solares térmicos aumentan el rendimiento a bajas temperaturas, hecho por el cual esta tecnología es óptima para el aprovechamiento solar.

### **V.6 Refrigeración solar en México**

Por supuesto, y como se ha hecho notar anteriormente, México posee instalaciones propias para el uso y aprovechamiento de la energía solar.

Las universidades han buscado ayudar a las comunidades que están más alejadas de las plantas eléctricas y han creado prototipos para el futuro.

Un caso reciente, se da en la Universidad de Colima, en donde se ha creado un sistema de refrigeración solar por absorción, buscando el beneficio de la población, con un esquema como el siguiente:



Por supuesto, no se trata de enumerar cada uno de los pasos del diseño, lo más importante en este punto es su implantación y el correcto funcionamiento del mismo:



### **V.7 Una visión al futuro**

Es de hacer notar que el aprovechamiento de la energía solar no se ha de detener, y por ello, se marca un futuro prometedor en este tema, con un sistema solar térmico integrado; la vista general sería:



# “UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

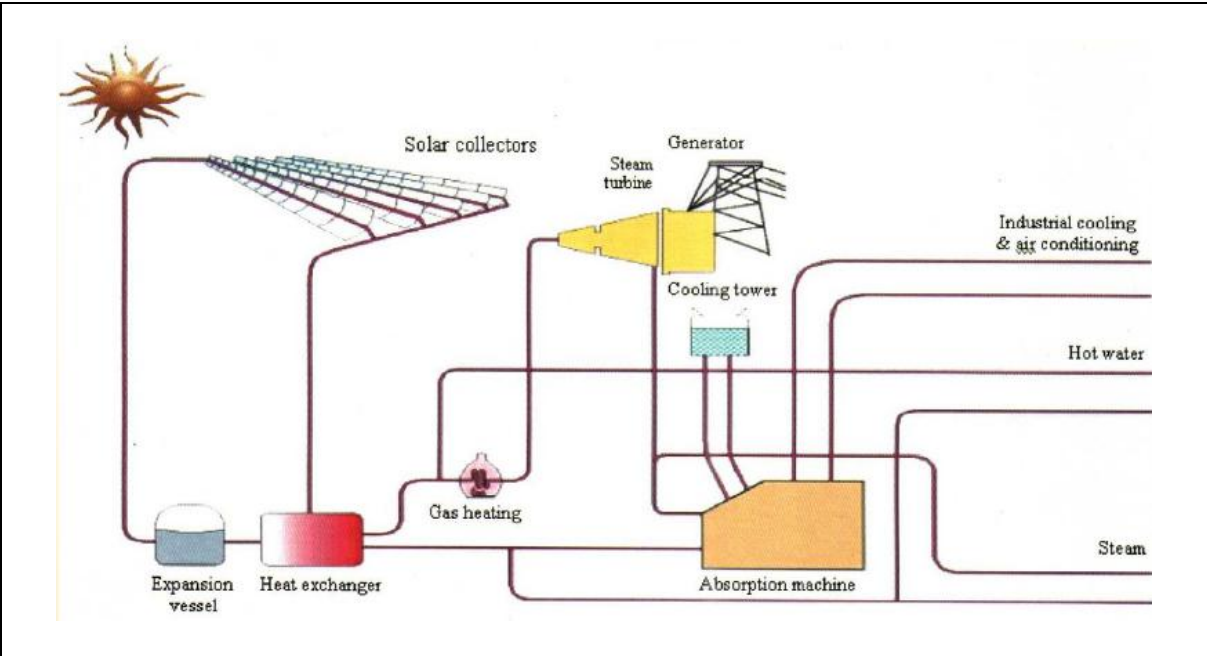
## Capítulo V: Refrigeración solar



Y su diagrama general sería el siguiente:

“UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR”

Capítulo V: Refrigeración solar



## **CONCLUSIONES**

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico de las naciones. Al mismo tiempo, el desarrollo tecnológico determina la utilización de ciertos tipos de energía y, por lo tanto, la disponibilidad de ese recurso.

Dentro de estos recursos se encuentran aquellos no renovables como el petróleo y el gas; así como los recursos renovables, como: la energía eólica, la biomasa, oceánica, olas, mareas, el sol, etcétera.

La principal fuente de energía renovable es el Sol (que es el tema que nos atañe); el cual, envía a la Tierra únicamente energía radiante (luz visible, radiación infrarroja y radiación ultravioleta).

La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. En este sentido, se puede decir que México es un país con alta incidencia de energía solar en la mayor parte de su territorio.

Cabe mencionar que, aunque la energía solar tiene muchas aplicaciones, su ocupación en cuanto a refrigeración es relevante, puesto que toma los aparatos terrestres para su almacenaje y procesamiento, y su uso para beneficio del hombre. Esto se debe, principalmente por dos razones; por un lado, porque implica un gran reto tecnológico el desarrollar sistemas de este tipo. Por otro lado, está el hecho de que esta aplicación coincide la disponibilidad con la necesidad; esto es, entre más flujo de energía radiante llega a un

determinado lugar, más altas son las temperaturas ambientales y, por lo tanto, más se requiere de la refrigeración o enfriamiento.

Los sistemas de refrigeración que se utilizan en mayor medida, son: el sistema de refrigeración por compresión y el sistema de refrigeración por absorción. Estos sistemas se basan en la evaporación o gasificación de un líquido a baja presión. Al igual que un sólido absorbe calor para pasar al estado líquido, un líquido también debe de absorber calor para vaporizarse o pasar al estado gaseoso.

En los últimos años, se ha venido trabajando en sistemas de refrigeración que utilizan la radiación solar para producir el efecto de enfriamiento.

Tanto el sistema de refrigeración por absorción como el de compresión, pueden ser adaptados para que funcionen con energía solar. El primero, mediante la utilización directa de la energía solar como fuente de energía térmica; el segundo, mediante la conversión de la energía solar en energía mecánica o eléctrica para hacer funcionar el compresor de un sistema convencional.

Debido a la intermitencia propia de la radiación solar, lo más sensato es pensar en sistemas de refrigeración intermitentes, aunque también se pueden desarrollar sistemas que operan continuamente, pero que necesitan de un sistema de almacenamiento y de una fuente auxiliar de energía para que puedan seguir operando en las horas en que no hay radiación solar. El decidirse por algún tipo de sistema también tiene que ver con la aplicación que se le vaya a dar.

Finalmente, creemos que el aprovechamiento de la energía solar para producir refrigeración, nos permitirá conservar los recursos (o parte de ellos, al menos) no renovables que tenemos.

Asimismo, al tratarse de una energía limpia, también puede ofrecer el beneficio de proteger al medio ambiente.

Cabe hacer mención del costo de equipo y de sistemas; puesto que actualmente resulta costoso, al tratarse de una tecnología innovadora y, aún, en estado experimental. Se prevé que en el futuro, sea más accesible para un mayor número de personas.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>Biogás</b>	Gas combustible, mezcla de metano con otras moléculas, formado en reacciones de descomposición de la materia orgánica (biomasa)
<b>Clorofluorocarburos</b>	Moléculas orgánicas formadas por átomos de Cl y F unidos a C. Por ejemplo CCl <sub>3</sub> F (Freón-11) o CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (Freón-12). Se han utilizado mucho en los "sprays", frigoríficos, etc. Son los principales responsables de la destrucción de la capa de ozono.
<b>Combustible de una central nuclear</b>	Es el uranio contenido en pastillas. Muchas de estas pastillas se introducen en una varilla y muchas varillas juntas en el reactor.
<b>Células fotovoltaicas</b>	Dispositivos formados por metales sensibles a la luz que desprenden electrones cuando los fotones inciden sobre ellos. Convierten energía luminosa en energía eléctrica.
<b>Dobles enlaces coordinados</b>	Parte de una molécula en la que en su cadena de carbonos se alternan enlaces sencillos y dobles. Ejemplo - C = C - C = C - C = C -. Se forma así una nube deslocalizada de electrones en la que la llegada de un fotón puede variar el estado de oxidación de la molécula. Así se transforma energía luminosa en energía química.
<b>Duración del día ártico</b>	En las zonas cercanas a los polos -hasta el círculo polar- alternan a lo largo del año, seis meses en que la noche dura 24 horas con otros seis en los que la luz del sol ocupa las 24 horas. Sucede esto por la inclinación del eje de la Tierra respecto al plano de la eclíptica
<b>Eclíptica</b>	Los antiguos llamaron así a la línea del cielo en la que se producen los eclipses. Coincide, lógicamente, con la línea que marca el plano de la órbita de la Tierra alrededor del sol, que es prácticamente el mismo que el del resto de los planetas y el mismo que el plano de giro de la Luna alrededor de la Tierra.

<b>Entropía</b>	En física, es un concepto en termodinámica, mecánica estadística y teoría de la información. Los conceptos de información y entropía están ampliamente relacionados entre sí, aunque se tardó años en el desarrollo de la mecánica estadística y la teoría de la información para hacer esto aparente. Los fluidos tienen más entropía que los sólidos.
<b>Etanol</b>	Alcohol del etano. $\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH}$
<b>Fotón</b>	Cuanto de luz. Cantidad indivisible de energía que interviene en los procesos de emisión y absorción de la radiación electromagnética. Su energía depende de la frecuencia.
<b>Freon 12</b>	Es diclorodifluorometano. Se utiliza como refrigerante en sistemas de aire acondicionado directos e indirectos industriales, comerciales y familiares; en refrigeración familiar, en compartimientos para helados o para alimentos congelados, en frigoríficos, etcétera
<b>Hidrocarburos</b>	Compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno. Los átomos de C pueden formar largas cadenas. Así, por ejemplo, el hidrocarburo más sencillo es el $\text{CH}_4$ (metano). La gasolina $\text{C}_8\text{H}_{18}$ está formada principalmente por diferentes isómeros del octano.
<b>Hidroxilo</b>	Radical $\text{HO}_2^-$ . Procede del peróxido de hidrógeno (agua oxigenada): $\text{H}_2\text{O}_2$
<b>Metanol</b>	Alcohol del metano. $\text{CH}_3\text{OH}$
<b>Milibar</b>	Unidad de presión habitual en meteorología. Sus equivalencias son: 1013 milibares = 1 atmósfera = 760 mm de Hg = $1033,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$
<b>Pinamómetro</b>	Es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal.
<b>Piroheliómetro</b>	Es un instrumento que se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos. Es decir, es un instrumento que mide radiación directa.

**Posición del Sol en el centro de la órbita**

El Sol está situado en uno de los focos de la órbita elíptica, pero como la excentricidad de la elipse es muy pequeña, se puede considerar que está en el centro. La distancia de la Tierra al Sol es de unos 150 millones de kilómetros, con un diámetro mayor de la elipse que es sólo 1/270 veces mayor que el diámetro menor. Asimismo, bien que la órbita terrestre es prácticamente un círculo ayuda a evitar el error, relativamente frecuente, de pensar que el que sea verano o invierno depende de las variaciones de distancia entre nuestro planeta y el Sol.

**Refrigerante**

Sustancia que se utiliza para bajar la temperatura a punto de congelación.

**Refrigerante primario**

Son fluidos utilizados en la transmisión del calor que, en un sistema frigorífico, absorbe calor a baja temperatura y presión, cediéndolo a temperatura y presión más elevadas. Este proceso tiene lugar, generalmente, con cambios de estado del fluido



## **BIBLIOGRAFÍA**

- ⇒ ASHRAE, Refrigeration Handbook (1994). Absorption Cooling, Heating and Refrigeration Equipment.
- ⇒ Chinnappa JCV, (1961). Experimental Study of the Intermittent Vapour Absorption
- ⇒ Corberán, J. M., Fernández de Córdoba, P., Ortuño S., Ferri V., González J., Modeling of Compact Evaporators and Condensers, Sixth International
- ⇒ Corberán, J. M., Fernández de Córdoba, P., González J., Alias, F., Semiexplicit Method for Wall Temperature Linked Equations (SEWTLE): A General Finite-Volume Technique for the Calculation of Complex Heat Exchangers, Numerical Heat Transfer, Part B vol 40 pp. 223-230,1996.
- ⇒ E. Torrella. La producción de frío. SPUPV, 2000.
- ⇒ El-Shaarawi MAI, (1986) Ramadan RA. Solar refrigeration in the Egyptian climate. Solar Energy 37:347–61.
- ⇒ Folkerts L., Van Orshoven D., Pavic D. and Mack M. (1995) TIM insulated Flat Plate Collectors using advanced Plastic Materials. Proc. 2<sup>nd</sup> Munich Discussion Meeting 95, Germany.
- ⇒ Gaia R., Bessone H., Cortés A., (1999). Energía Solar para Refrigeración Doméstica. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3 N° 1. pp. 03.17-03.20.
- ⇒ Guillen Marco J.A. (1988). Cogeneración y gas natural: Sistemas de cogeneración. Empresa Nacional del Gas, S.A. Avenida de América 38, 28028 Madrid, España.
- ⇒ Herold K.E., Radermacher R., Klein S. (1996) Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, Boca Raton, USA.

- ⇒ Hollands, K.G.T. and Iynkaran K. (1993) Analytical Model for the thermal conductance of compound honeycomb transparent insulation, with experimental validation. *Solar Energy*, 51,3,pp 223-227, USA.
- ⇒ Izquierdo M., Hernández F. and Martín E. (1994) Solar cooling in Madrid: available solar energy. *Solar Energy*, Vol. 53, 431- 443, UK.
- ⇒ Izquierdo M., Hernández F. and Martín E. (1997) Solar cooling in Madrid: energetic efficiencies. *Solar Energy*, Vol. 60, 367-377, UK.
- ⇒ J. Navarro, R. Cabello, E. Torrella. Fluidos refrigerantes. Tablas y diagramas. AMV, 2003
- ⇒ Joudi KA, Madhi SM., (1987). An experimental investigation into a solar assisted desiccant–evaporative airconditioning system. *Solar Energy* 39:97–107.
- ⇒ Mark O.McLinden et al., NIST Thermodynamics and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerants Mixtures-REFPROP Version 6.0, (1998)..
- ⇒ M. Izquierdo and E. Martín (1995). The engine exhaust gases as energy source of an air condensed mobile absorption machine, 19th International Congress of Refrigeration, The Hague.
- ⇒ M. Izquierdo Millán, J. Turet Claparols y M. Poveda Ciorraga (1991). Climatización de edificios con gas natural. Montaje e Instalaciones, Febrero 1991, 79- 85, Madrid.
- ⇒ Mills, A. F., Transferencia de calor. Ed. Irwin, (1995)
- ⇒ Nestor Quadri. Energía solar. Buenos Aires. Editorial Alsina
- ⇒ Nestor Quadri. Energía fotovoltaica. Buenos Aires. Editorial Alsina
- ⇒ Refrigeration Cycle Employing the Refrigerant–Absorbent Systems of Ammonia–Water and Ammonia–Lithium Nitrate. *Solar Energy* 5:1–18.
- ⇒ Shiran Y, Shitzer A, Degani D., (1981). Computerised design and economic evaluation of an aqua–ammonia solar operated absorption system. *Solar Energy* 29:43–54.

## **REFERENCIAS**

- ⇒ [www.cartif.es](http://www.cartif.es)
- ⇒ [www.cie.unam.mx](http://www.cie.unam.mx)
- ⇒ [www.foronuclear.org](http://www.foronuclear.org)
- ⇒ [www.ggw.org/~cac/IcyBall/crosley\\_icyball.html](http://www.ggw.org/~cac/IcyBall/crosley_icyball.html)
- ⇒ [www.refrigeración.glosario.com](http://www.refrigeración.glosario.com)