



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO
DESECANTE UTILIZANDO COLECTORES
TÉRMICOS SOLARES, UBICADO EN LAS
SALAS NORTE Y SUR, NIVEL TERRAZA DE
LA TORRE DE INGENIERÍA**

T E S I S

Para obtener el título de:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

NORBERTO JESÚS RAMÍREZ RAMÍREZ
Director de tesis: Dr. José Luis Fernández Zayas.



Ciudad Universitaria, México D.F., junio 2007.



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.

Agradecimientos.

A mis padres:

Por la herencia más valiosa que pudiera recibir, fruto del inmenso apoyo, gratitud, cariño y confianza que siempre en mí han depositado, para que su esfuerzo para hacer de mí un profesionalista no fuera en vano. Con amor.

A mis hermanas

Por que siempre depositaron en mí su confianza para seguir adelante, me dieron ánimos y su ejemplo para nunca rendirme y sobre todo me hicieron darme cuenta lo importante de terminar un ciclo más en mi preparación como profesionalista y ser humano.

A mis amigos:

Por su apoyo y dedicación a lo largo de mi carrera como profesionalista, por compartir las tantas emociones vividas en este ciclo de nuestras vidas, tanto buenas como malas, pero gracias por siempre estar a mi lado.

¡Con mucho amor y cariño!.

Norberto Jesús Ramírez Ramírez

Pensamientos

Hoy llegué al término de una etapa más en el curso de mi vida. Tantas risas, lágrimas, regaños, alegrías, tristezas, un sin fin de emociones envueltos en un compañerismo pleno, que a través de los años se va formando entre profesores y alumnos.

Nunca olvidaré tantos momentos que ahí deje incrustados, que aunque pasen los años seguirán presentes revolviendo infinidad de recuerdos, dejando en mí una satisfacción incalculable y aunque ahora me inundan de tristeza por su término, mañana me llenarán de orgullo por haberlos vivido.

Empiezo una nueva etapa en mi vida, que al igual que todas me llenarán de inquietudes y desconciertos, el cual sabré intercambiar por seguridad y anhelo, para hacer de mí un hombre de bien, enaltecido en cuerpo y alma y daré grandes frutos, llenando a mis padres de orgullo: frutos que serán reconocidos hasta donde yo quiera que lo sean.

Y no digo adiós sino hasta pronto Facultad de Ingeniería, gracias por darnos las herramientas necesarias para formarme como un ingeniero más, como tantos que están bajo tu guía

¡Gracias!

Norberto Jesús Ramírez Ramírez.

Índice

1. Introducción	
1.1 Descripción de la problemática del confort térmico	1
1.2 ¿Qué es el confort?	2
1.3 Parámetros y factores de confort térmico	2
1.4 Expectativas del confort	3
1.5 Adaptabilidad del espacio	4
1.6 Importancia del confort	4
2. Colectores Térmicos	
2.1 Colectores de placa plana	7
2.1.1 Pérdidas térmicas	7
2.1.1.1 Efecto invernadero	8
2.2.1 Pérdidas ópticas	9
2.2 Tipos de instalaciones	9
2.2.1 Circulación natural o termosifón	10
2.2.2 Circulación forzada	10
2.3 Acumulador	11
2.4 Fluido caloportador	11
2.5 Aislamientos	12
2.6 Descripción de la instalación en la Torre de Ingeniería	12
3. Antecedentes	
3.1 Refrigeración solar activa	13
3.2 Ejemplo de un sistema desecante en Alemania	15
3.3 Aplicaciones de refrigeración solar en México. Sonntlan Mexicali	16
4. Operación de los sistemas de refrigeración solar	
4.1 Desecación	18
4.1.1 Los fenómenos de la adsorción y la absorción	18
4.2 Refrigeración por adsorción	20
4.2.1 Desecantes sólidos	20
4.2.2 Operación de los sistemas desecantes sólidos	23
4.3 Elección del sistema de acondicionamiento solar desecante	25
5. Cálculo de calor generado por la planta solar	
5.1 Datos requeridos para correr el programa	26
5.2 Gráficas en verano	27
5.3 Gráficas en invierno	30
5.4 Resultados en verano	32
5.5 Resultados en invierno	32
6. Cálculo de Carga de Enfriamiento	
6.1 Carga variable	34
6.1.1 Carga de radiación solar a través de vidrios	35
6.1.2 Conducción a través de muros y techos	35

6.2 Carga constante	36
6.2.1 Carga debida al alumbrado	36
6.2.2 Carga debido a personas	36
6.2.3 Carga debido a equipo	36
6.3. Cantidad de aire necesario	37
6.3.1. Aire de retorno o proceso de mezclado	37
6.4. Carga máxima del equipo	37
6.5. Condiciones de diseño	38
6.6. Resultados	38
6.6.1 Carga variable	38
6.6.2 Porcentajes de las diferentes ganancias de calor	39
6.7. Resultados de la ganancia de calor de las dos salas	41
7. Análisis Económico	
7.1 Condiciones económicas para un sistema desecante	42
7.2 Resultados	43
8. Recomendaciones	44
9. Alternativas	
9.1 Refrigeración por adsorción (ciclo cerrado)	46
9.2 Refrigeración por absorción con sorbentes líquidos (ciclo cerrado)	47
9.3 Paneles fotovoltaicos	49
9.3.1 Ciclo de refrigeración solar por compresión de vapor	49
9.3.2 Ciclo de refrigeración termoeléctrico (Peltier)	49
10. Conclusiones	51
11. Fuentes consultadas	
11.1 Artículos digitales	52
11.2 Libros	52
11.3 Programas utilizados	52
12. Apéndice	
12.1 Cálculo de carga de enfriamiento de forma específica. (Sala norte y sur)	53
12.2 Tablas consultadas	56

Prólogo

Esta tesis en su capítulo 1 habla sobre la problemática del confort térmico que desde su construcción de la torre se ha presentado, y para atacar ese problema, partimos analizando su definición, parámetros, factores, importancia y expectativas de confort térmico, mostrando un ejemplo de la frecuencia de accidentes que ocurren en una fábrica a nivel industrial, lo que podemos decir que el confort térmico es de suma importancia en la actualidad, y más en nuestro país, que presenta una normatividad muy baja en cuanto a éste concepto se refiere. Mucha gente piensa que el confort térmico es un lujo innecesario, por lo que no le toma las medidas necesarias y pertinentes para tenerlo presente, espero que después de leer un poco sobre el primer capítulo de este trabajo cambie su manera de pensar.

El capítulo 2, explica la definición de colector solar, analiza de forma detallada los colectores de placa plana, los elementos que lo constituyen, así como las pérdidas tanto ópticas como térmicas que se presentan en ellos. Esto es, para entender claramente su funcionamiento, ya que ellos representan la fuente de energía de nuestro sistema. No sin antes explicar los diferentes tipos de transferencia de energía, debido a que el sistema de captación solar está subordinado por éstos procesos. Finalmente, describe los tipos de instalaciones existentes y la planta solar instalada actualmente a nivel terraza de la torre de Ingeniería.

El capítulo 3, contiene una breve reseña histórica acerca de la refrigeración solar. Muestra los diferentes países alrededor del mundo que utilizan colectores solares, para sistemas de refrigeración, así como los diferentes tipos de sistemas existentes, mostrando ejemplos de un sistema desecante instalado en una cafetería en Alemania, así como un sistema de absorción instalado en nuestro país, el cual ha sido abandonado en nuestros días.

El capítulo 4, explica la operación, las diferentes aplicaciones, fluidos de trabajo y coeficientes de operación (COP's) de los sistemas de refrigeración solar. Pero hace hincapié a los fenómenos de adsorción y absorción, debido a que los materiales desecantes sólidos realizan dichos fenómenos durante el proceso de acondicionamiento de aire. Explica de forma detallada dicho proceso con la ayuda del diagrama psicrométrico, indicando las diferentes condiciones de temperaturas y humedad del aire en una máquina de acondicionamiento por desecación.

El capítulo 5, muestra los resultados calculados, tanto en tablas como gráficas, de nuestra planta instalada en la torre de Ingeniería, explicando los datos requeridos o utilizados para correr el programa creado por el doctor Zayas.

El capítulo 6, explica la división de la carga de enfriamiento, carga variable y carga constante, y la determina aplicando los conceptos básicos de transferencia de calor. Mostrando los resultados del cálculo de ambas salas, en las gráficas correspondientes.

El capítulo 7, se hace un análisis económico del sistema desecante propuesto, con el objetivo de observar el costo comparado con el ahorro de energía, para ello se basa; en la

ecuación utilizada con una tecnología de refrigeración solar instalada en Grecia. Observando el resultado en la gráfica de periodo de reembolso.

El capítulo 8, se muestran imágenes de instalación y opciones de un equipo de ruedas desecantes de la marca Greenheck, el cual está disponible por varios proveedores de la ciudad de México.

El capítulo 9, explica las diferentes alternativas que se pueden utilizar para acondicionamiento de aire utilizando energía solar, lo cual hace que nuestro estudio, se vuelva más minucioso y detallado, ya que es conveniente saber que tipo de sistema es más rentable, y por lo tanto representa mayor ahorro de energía.

Las conclusiones son lo más concretas y claras posibles, para que se queden en mente las muchas ventajas de utilizar estos sistemas ahorradores de energía utilizando energía solar.

Los últimos dos capítulos, muestran todas las páginas web, artículos y libros utilizados para el proyecto, así como en su mayoría las tablas utilizadas para los cálculos realizados.

1. Introducción

Actualmente los recursos energéticos fósiles son utilizados en gran medida por los países industrializados, lo que representa un problema debido a que las reservas energéticas se agotan, y el crecimiento de la población demanda mayor cantidad de energéticos, lo que trae como consecuencia que los energéticos no renovables aumenten su precio en gran medida, a parte de que estos combustibles afectan al medio ambiente con problemas ecológicos; debido al desprendimiento de gases, durante su combustión.

Todos estos energéticos son utilizados en gran medida para la producción de electricidad, por lo que cada vez aumenta el precio de la energía eléctrica. Debido a ello hay que enfocarse en otras alternativas energéticas, sobre todo utilizando energéticos no renovables, los cuales además de contaminar en menor cantidad al ambiente, presentan ahorro de energía.

Una de estas alternativas es la energía solar, la cual en nuestro país es un recurso, el cual ha sido poco aprovechado y se dispone en gran medida; debido a que el equipo utilizado es relativamente caro debido a su tecnología; sin embargo, hay que tener en cuenta que los costos de inversión son fácilmente reembolsados con el ahorro de energía que traen consigo.

En nuestros días sabemos que un 15% aproximadamente de la energía utilizada en todo el mundo es usada para refrigeración y aire acondicionado, con procesos de varios tipos.ⁱ

La torre de Ingeniería ubicada en ciudad universitaria, al oriente de la alberca y en frente de la facultad de ingeniería, planeó instalar, en la primera fase de la construcción del edificio, un gimnasio en el último piso. Los baños de éste, hubieran provocado una alta demanda de agua caliente. Para esta instalación se planeó e instaló una *planta solar*, con el reto de *ahorrar energía y dinero*. La instalación solar existe aunque, a la fecha, no se ha puesto en marcha. De esta manera se consideró uno de los principios de la UNAM como institución educativa que es de sensibilizar a la gente en cuestión del uso de energía.ⁱⁱ

Se planea instalar un sistema de refrigeración solar utilizando los colectores de placa plana, para acondicionar las salas norte y sur, ubicadas en la torre de ingeniería a nivel terraza, con el propósito de obtener el confort deseado en dichas salas, analizando la carga de enfriamiento necesaria para retirar de la sala, así como su rentabilidad económica y algunos aspectos importantes para su operación.

1.1 Descripción de la problemática del confort térmico

La torre de ingeniería ubicada en ciudad universitaria presenta variedad de quejas ocasionadas por la falta de confort térmico. El primer estudio de confort detectó en el primer piso bajas temperaturas frecuentes entre 10 y 15° C en épocas de frío.

Estas temperaturas y condiciones son inaceptables para la salud de los ocupantes y tampoco les permite trabajar eficientemente. Otra encuesta de confort realizada, detectó que en épocas calurosas se presenta calor en el piso 5°,6° y en las salas norte y sur, nivel terraza de la torre de ingeniería.

El personal de la torre proponía usar la planta solar existente con otro sistema de calefacción, para calentar los primeros pisos en las épocas de frío. Además se podría utilizar con mayor efectividad el calor generado a través de la planta solar en la terraza para generar frío.

Estas salas son utilizadas frecuentemente para eventos importantes de la torre de ingeniería. Por lo que se aprovechará el calor generado por la planta solar para acondicionar las salas norte y sur a nivel terraza.

El ahorro de energía fue uno de los principales propósitos cuando se construyó la torre de ingeniería. El sistema de acondicionamiento se hace con base en este lema; por lo que se hace un análisis de nuestra planta solar, para evaluar un sistema de acondicionamiento de aire para dichas salas. Teniendo en cuenta la importancia del confort, para obtener un clima más saludable y amigable.

1.2 ¿Qué es el confort?

La Sociedad Norteamericana de Ingenieros en Calentamiento, Refrigeración y Aire Acondicionado, ASHRAE por sus siglas en inglés, ha definido el confort térmico como: *Aquella condición de la mente que expresa satisfacción con la temperatura ambiente.*ⁱⁱⁱ

El confort térmico es una condición esencial para lograr la satisfacción de los ocupantes de una edificación y realizar con eficiencia sus actividades. Una de las definiciones más aceptadas de lo que se entiende por confort térmico establece que es la “*condición mental bajo la cual expresan satisfacción la mayoría de los ocupantes de un determinado ambiente térmico*”. Se estima que más del 90% del tiempo, en promedio, las personas realizan sus actividades dentro de un espacio construido, donde no siempre las condiciones de temperatura y humedad son las adecuadas.^{iv}

Esto es particularmente cierto en una gran variedad de edificios contemporáneos que debido a sus condiciones inadecuadas de diseño: orientación y materiales empleados presentan condiciones fuera de la zona de confort. Para acceder a tales condiciones, normalmente se debe recurrir a sistemas de acondicionamiento de aire, cuyo gasto de energía puede llegar a ser oneroso, con las consecuencias al medio ambiente.

Por las características del territorio nacional, en México predominan los climas cálidos, lo cual, junto con los diseños inadecuados a la región, hace necesario el uso de *sistemas de aire acondicionado*. Localidades con un clima cálido seco ocupan casi dos terceras partes del territorio nacional. Normalmente, en la selección de esos sistemas se utilizan estándares de confort generados en otros países para sus necesidades, es decir, los niveles térmicos seleccionados a menudo no corresponde a los deseables para las características de la población de cada región.

En muchos edificios comerciales en la zona metropolitana del valle de México se presentan condiciones extremas de temperaturas. Por la mañana, las temperaturas son relativamente bajas y por la tarde, éstas se elevan hasta alcanzar niveles de incomodidad térmica, que resultan en problemas de eficiencia y productividad en los ocupantes.

1.3 Parámetros y factores de confort térmico

La percepción del ambiente térmico no es algo que dependa únicamente de los parámetros ambientales, es decir, de la temperatura del aire, la humedad relativa, velocidad del aire, temperatura radiante. Es un fenómeno que incluye muchos más factores del

entorno interior y exterior, del sujeto que percibe estos parámetros. Incluso habría que considerar factores culturales y sociales. Tabla 1.1

TABLA 1.1
Parámetros y factores de confort humano.¹

Parámetros	Ambientales:	Temperatura del aire	Variabilidad temporal y espacial
		Humedad relativa	
		Velocidad del aire	
		Temperatura radiante	
	Arquitectónicos:	Adaptabilidad del espacio	
		Contacto visual con el exterior	
Factores	Personales:	Sexo	
		Edad	
		Peso (constitución corporal)	
		Actividad <ul style="list-style-type: none"> Tasa de metabolismo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Basal ▪ Muscular 	
		Vestimenta	
		Estado de salud	
		Historial térmico <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inmediato ▪ Mediato 	
		Tiempo de permanencia	
	Socioculturales:	Expectativas de confort	

1.4 Expectativas de Confort.

Las expectativas de confort dependen de varias circunstancias, primero, del lugar en que se este, si es interior o exterior, si se esta en un interior nuestras expectativas serán mucho más altas que si estamos en el exterior por lo que tenderemos a notar más la perdida o ganancia de calor, la velocidad del aire, la temperatura radiante incluida la del sol, la humedad relativa, etc.

Otra circunstancia que influye en nuestra percepción del ambiente térmico es si nosotros decidimos exponernos a unas *condiciones ambientales determinadas*. Los ejemplos más claros los tenemos en las actividades de esparcimiento y deportivas, por ejemplo, tomar el sol en una playa ó esquiar en nieve, en estas dos actividades nos exponemos por periodos de tiempo considerables a condiciones que están muy lejos de lo que se considera confort pero las aceptamos o incluso más, las disfrutamos cuando estas mismas no las toleraríamos en un espacio cerrado o impuestas por otras circunstancias ajenas a nosotros.

¹ Francisco J. Chávez del Valle, “La Percepción del Ambiente Térmico”, “La Ciudad como Entorno”, UPC, ETSAB, Dpto. Construcciones Arquitectónicas I.

Con la *época del año* también cambian nuestras expectativas de confort, especialmente en las regiones del planeta donde las condiciones entre unas y otras épocas del año son más acentuadas, 18° C en un interior en invierno pueden ser bastante tolerables mientras que en verano tal vez necesitemos 4 ó 5 grados más para sentirnos confortables. Y también tenemos el caso contrario que 30° C en verano lo podemos tomar como normal y en invierno nos parecería demasiado caluroso.

Evidentemente no en todas las sociedades se tienen o se pueden tener las mismas expectativas de confort, debido a las diferencias culturales y económicas. Parece que mientras más urbana y más rica sea una sociedad tendrá unas expectativas de confort más altas.

1.5 Adaptabilidad del Espacio

Una de las características que puede modificar la percepción térmica es la adaptabilidad que permite el espacio, es decir, como nos permite este modificar la relación entre el ambiente exterior y el interior al manipular elementos de control ambiental como: *ventanas, parasoles, ventilas, sistemas de acondicionamiento, etc.* Además de cambiar nuestra ubicación dentro de éste para evitar o aprovechar las distintas variaciones del clima exterior como: la radiación solar o la sombra, las corrientes de aire, la proximidad a fuentes de calor como radiadores o salidas de aire acondicionado, etc.

Si podemos actuar sobre los controles del edificio tal vez no hagamos ningún cambio en estos pero el simple hecho de saber que podemos hacerlo nos hace aceptar mejor las condiciones del espacio. Que de forma contraria al poder decidir sobre esto, tenemos un rechazo hacia el espacio y las condiciones de éste.

1.6 Importancia del confort

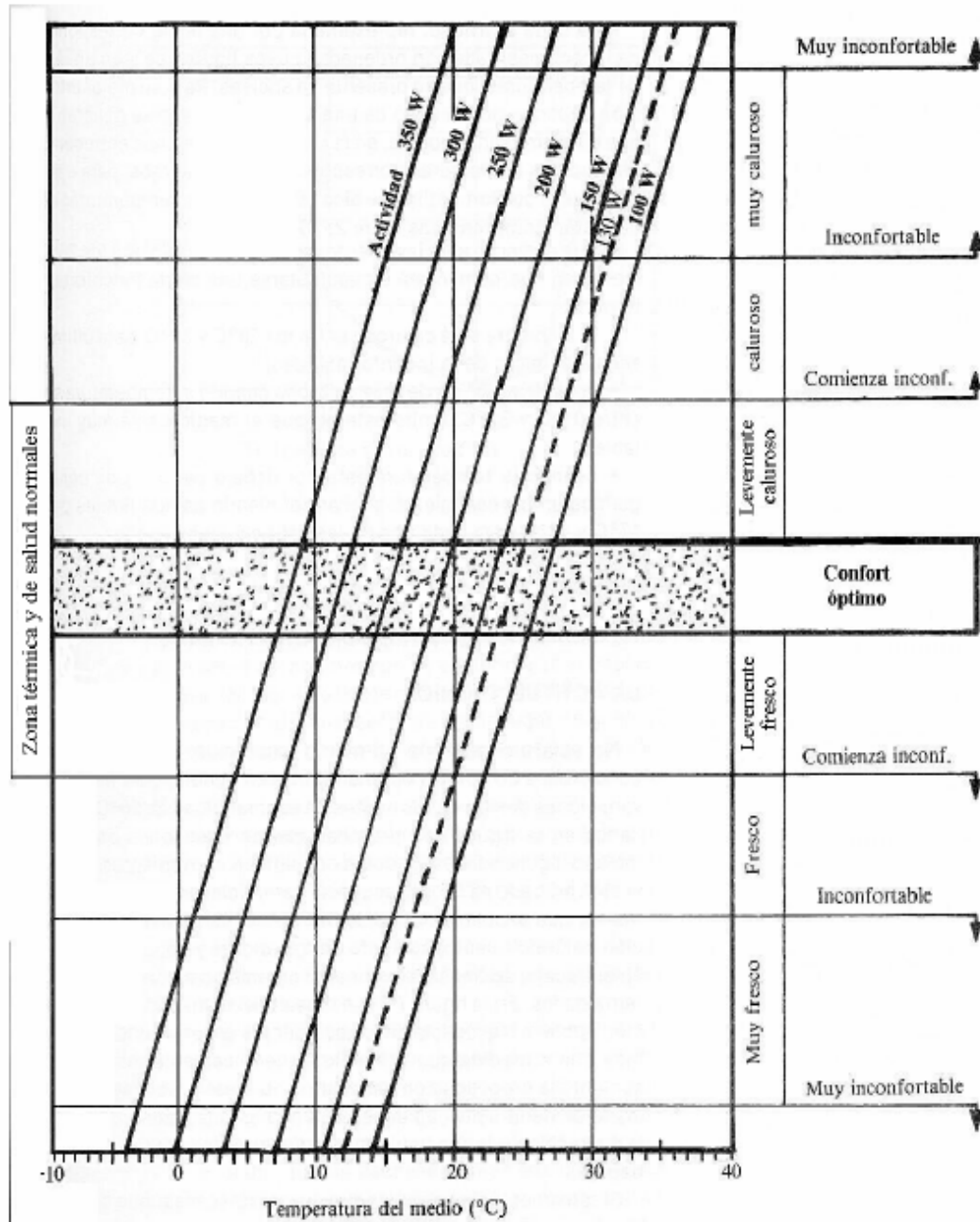
La búsqueda del confort pretende *proveer un clima en el interior de las edificaciones que resulte agradable a los individuos* o bien, que les sea de fácil adaptación.

La primera condición del confort es que el balance térmico de toda la energía generada y perdida por el organismo sea igual a cero. Si esto no sucede, el organismo se defiende poniendo automáticamente en acción los mecanismos termorreguladores. Factores como la humedad y la velocidad del viento influyen en la actividad de dichos mecanismos.

En la figura 1.1 presenta los límites del confort según la actividad física realizada. Cabe señalar que es difícil establecer un límite específico para el confort, dado que no todas las personas presentan la misma sensibilidad ni las mismas costumbres; por esta razón, siempre que se habla de confort es conveniente manejar zonas de confort. Lo que sí está probado es la consecuencia perjudicial de los medios no confortables, que producen fatiga, agotamiento físico y nervioso, disminución del rendimiento, aumento de los errores y riesgo de accidentes en el trabajo, además de exponer al organismo a contraer diversas enfermedades.

En la figura 1.2 muestra el resultado de una investigación sobre la frecuencia de los accidentes en una fábrica. Se comprueba que a medida que el medio es térmicamente más hostil, la preocupación del sujeto sobre ese problema va en aumento, apartando su atención

de la actividad específica que está realizando, favoreciendo la distracción y la consiguiente pérdida de eficiencia y seguridad en el trabajo.



Actividad	Tasa de producción de calor	
	W	W/m ²
Dormir	60	35
Descansar acostado	80	45
Sentado. Trabajo normal de oficina	100	55
Escribir en la computadora	150	85
Caminata (3 km/h)	200	110
Caminata rápida (6 km/h)	250	140
Trabajo pesado	más de 300	más de 170

Figura 1.1 Representación del área de confort humano en función de la temperatura y la actividad realizada.²

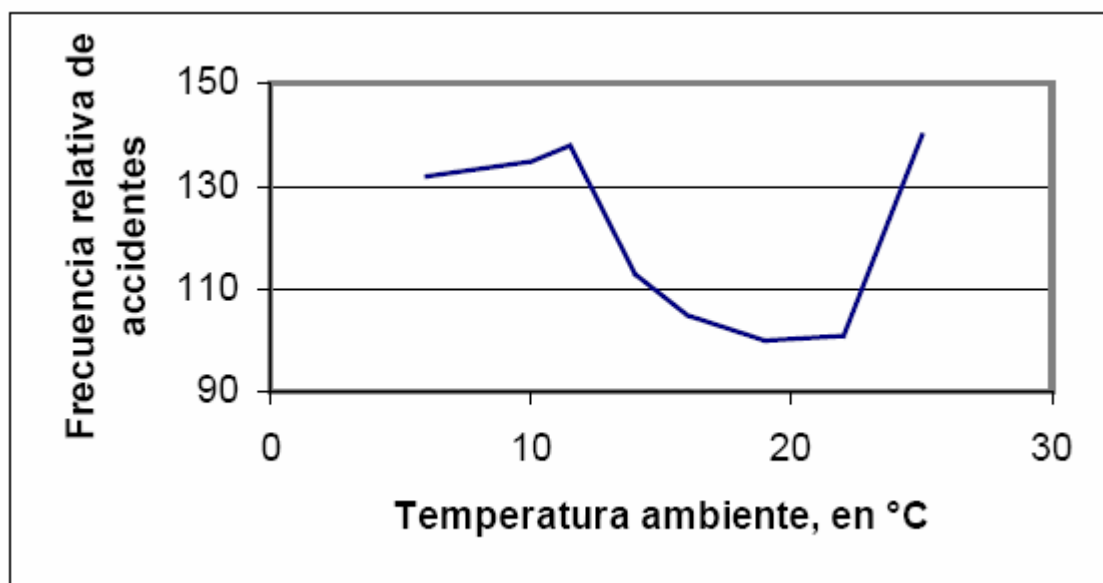


Figura 1.2 Frecuencia relativa de accidentes vs. Temperatura ambiente en °C.

REFERENCIAS.

ⁱ Lucas, (1988) IIR news, International Journal of Refrigeration, Vol. 21, No. 2, pp. 88, Great Britain.

ⁱⁱ Götz, Rupert "Diseño, simulación y optimización del sistema de ventilación natural de la Torre de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM. México DF.

ⁱⁱⁱ ASHRAE, (1989), *Fundamentals handbook*, cap 26, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, EUA.

^{iv} Dr. Juan José Ambríz García, Dr. José Roberto García Chávez, Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, "Determinación experimental de las condiciones de confort térmico en edificaciones".

² Genaro Correa, Rafael Almanza, "Filtros solares empleados como ventanas para obtener confort y ahorro de energía en edificaciones". Ingeniería de la energía solar I, Instituto de Ingeniería, UNAM

2. Colectores térmicos

La observación de la conservación de la radiación solar en energía solar térmica del fluido dió lugar, ya en el siglo XIX, a los primeros colectores térmicos comerciales y a las instalaciones de energía solar térmica activa. El primer industrial que fabricó colectores térmicos en serie parece que fue Clarence M. Kemp en 1892 en Maryland (EE.UU.).

Un colector solar es un tipo especial de intercambiador de calor térmico que transforma radiación solar en energía térmica utilizable. Se basa en la captación de energía mediante cuerpos expuestos a la radiación, preferentemente de color oscuro con el fin de mejorar la conversión.

El aprovechamiento mediante colectores térmicos de la energía solar es la aplicación más inmediata de las tecnologías solares. Usualmente, el dispositivo se utiliza para calentar un fluido que circulando por el colector transfiere la energía a un sistema de almacenamiento intermedio para su uso final en el momento de la demanda.

El rendimiento, porcentaje de la radiación incidente transformado en energía térmica del fluido, viene limitado por pérdidas de dos tipos: térmicas y ópticas.

Las *pérdidas ópticas* son las responsables de que sólo una parte de la radiación recibida sea absorbida por la placa metálica y consecuentemente transferible al fluido caloportador. Las *pérdidas térmicas* del colector hacia sus alrededores implican un porcentaje de la energía absorbida es cedida al entorno del colector y no al fluido hacia el sistema de almacenamiento. El colector como intercambiador tiene unas limitaciones de forma que transforma sólo una fracción de la radiación solar recibida en energía útil, energía térmica del fluido.

2.1 Colectores de placa plana

El colector de placa plana está constituido por un elemento absorbente metálico protegido térmicamente mediante un aislante y una cubierta de material transparente. Una caja rígida o carcasa da cuerpo y resistencia mecánica a todo el dispositivo permitiendo su anclaje en el lugar determinado. Este captador térmico es denominado colector de placa plana porque básicamente está constituido por una caja de superficie mucho mayor que su altura y utiliza una placa metálica como *superficie absorbente*.

Aprovechan tanto la radiación directa como la difusa; no necesitan del seguimiento del sol y requieren un mantenimiento prácticamente nulo.

La figura 2.1 presenta el esquema de un colector solar plano típico. La superficie absorbente está formada por una placa soldada a unos tubos conductores por los que circula el líquido portador que refrigera la placa. La caja o *carcasa*, abierta en la parte superior, incorpora en el interior un *aislante* como fibra de vidrio o lana de roca. La *cubierta* de la caja es suficientemente transparente a la radiación solar y opaca para la radiación en el infrarrojo térmico; así se genera el efecto invernadero en el interior del colector.

2.1.1 Pérdidas térmicas

En la mejora del rendimiento de los colectores solares de placa plana existen dos líneas de trabajo: la reducción de las pérdidas térmicas y el incremento de la energía solar absorbida.

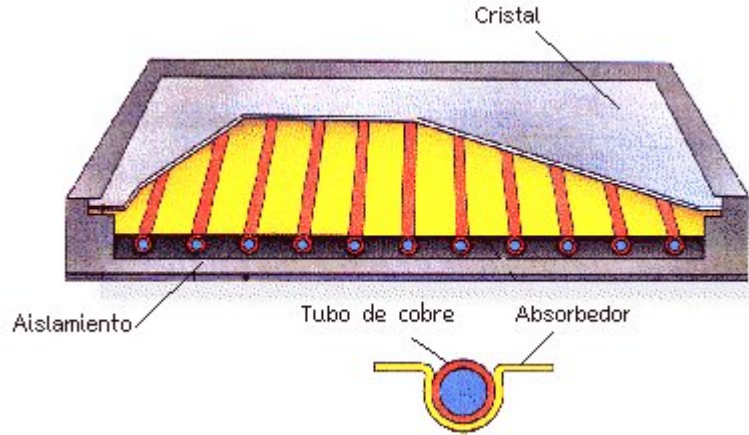


Figura 2.1 Esquema de colector de placa plana.

El sistema de captación solar está subordinado a los diferentes procesos de transferencia de energía.

- *Conducción*, que describe el transporte de calor por la interacción entre átomos y moléculas pero sin movimiento neto de materia.
- *Convección*, que describe la transferencia de calor mediante el movimiento directo de la materia, esencialmente de fluidos debido a las fluctuaciones de la densidad de ellos como consecuencia de las variaciones de la temperatura.
- *Radiación*, que es la transferencia de energía térmica mediante la radiación electromagnética y que por lo tanto no requiere necesariamente de soporte material.

2.1.1.1 Efecto invernadero

Si se tiene un colector por el que no circula fluido su temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura de equilibrio o de estancamiento. A la temperatura de equilibrio las ganancias en radiación solar del colector equilibran las pérdidas energéticas hacia el entorno y se obtiene la temperatura máxima que puede alcanzar el dispositivo. Cuando refrigeramos el colector haciendo circular el fluido por su interior, se extrae la energía útil del colector.

La reducción de pérdidas térmicas en un colector utilizando una cubierta transparente se debe a que ésta disminuye las pérdidas por convección pero principalmente se debe a la influencia sobre los términos radiativos explicada por el fenómeno conocido como *efecto invernadero*.

En la figura 2.2 se observan las gráficas de energía radiativa procedente del sol y energía emitida por una placa a 393 K. Éstas se superponen con el espectro de transmisión de la cubierta de vidrio correspondiente a las mismas longitudes de onda. El vidrio tiene una ventana de transmisión en el visible y en el infrarrojo cercano muy coincidente con la banda de emisión de la luz solar entre 0.25 μm y 2.5 μm . En cambio, la transmisión correspondiente a la banda de emisión del cuerpo a 393 K (desde 4 μm a 12 μm) en el infrarrojo térmico, es prácticamente cero. Esto significa que aproximadamente el 80% de la radiación solar incidente

en el colector es captada por la placa absorbente mientras para la energía emitida por la superficie captadora la cubierta es completamente opaca.

Un análisis más detallado de la realidad del proceso muestra que realmente lo que sucede es que gran parte de la radiación emitida por el cuerpo a 393 K es captada por la cubierta de vidrio aumentando esta forma de temperatura. En consecuencia, el vidrio radia energía por sus dos caras y la superficie absorbente recibe junto a la radiación solar la correspondiente a la mitad de la emisión del vidrio. La otra mitad de la energía radiada por el vidrio se pierde en el espacio exterior del colector térmico. Este intercambio de radiaciones permite el incremento de la temperatura media en el interior del colector y es conocido como efecto invernadero.

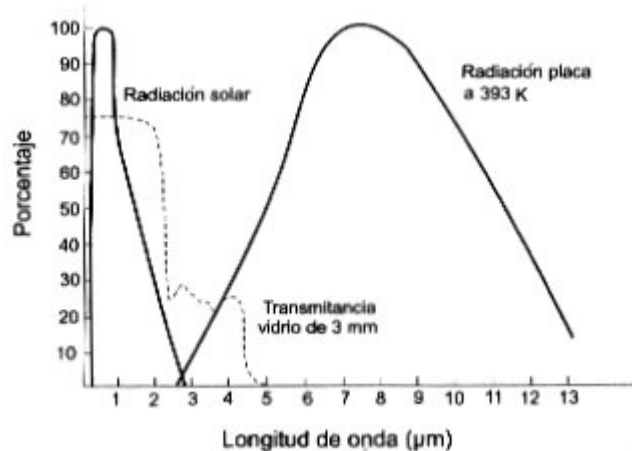


Figura 2.2 Espectro de emisión normalizado para el sol y un cuerpo negro a 393 K y transmisividad espectral del vidrio.

2.2.1 Pérdidas ópticas

Las pérdidas ópticas relacionan la energía solar recibida por el colector con la energía absorbida en la placa. La transmisión, reflexión y absorción de radiación solar y la infrarroja térmica por las cubiertas y la placa de un colector determinan su funcionamiento.

- *Transmisividad τ* . La cubierta del colector es un medio parcialmente transparente de forma que absorbe parte de la irradiancia solar incidente.
- *El producto transmisividad-absortividad*. La cantidad de energía absorbida por la placa captadora se obtiene como el producto de la radiación incidente, el factor de transmisividad de la cubierta τ , y el factor de absorción de la superficie captadora α .

2.2 Tipos de instalaciones

Una de las aplicaciones más intuitiva y directa de la energía solar son los sistemas térmicos solares dedicados al calentamiento, principalmente de agua. Existen también aplicaciones para calefacción donde el fluido refrigerante es directamente aire. Pero nos centraremos en los sistemas que utilizan agua.

2.2.1 Circulación natural o termosifón.

Estos sistemas toman el nombre de *circuitos por termosifón* porque la circulación del agua entre el captador y el depósito se realiza mediante la convección natural debido a la diferencia de densidades entre el agua caliente y el agua fría. El agua caliente tiene una densidad baja y tiene tendencia a ir hacia la parte alta del circuito (acumulador) y el agua fría con densidades más altas va hacia la parte baja del sistema (el captador).

En el montaje de la figura 2.3, cuando los rayos solares inciden sobre el captador, el agua caliente se calienta y circula por termosifón hacia el acumulador. El movimiento se mantiene siempre que haya suficiente radiación solar para mantener el *gradiente de temperatura* entre las dos zonas.

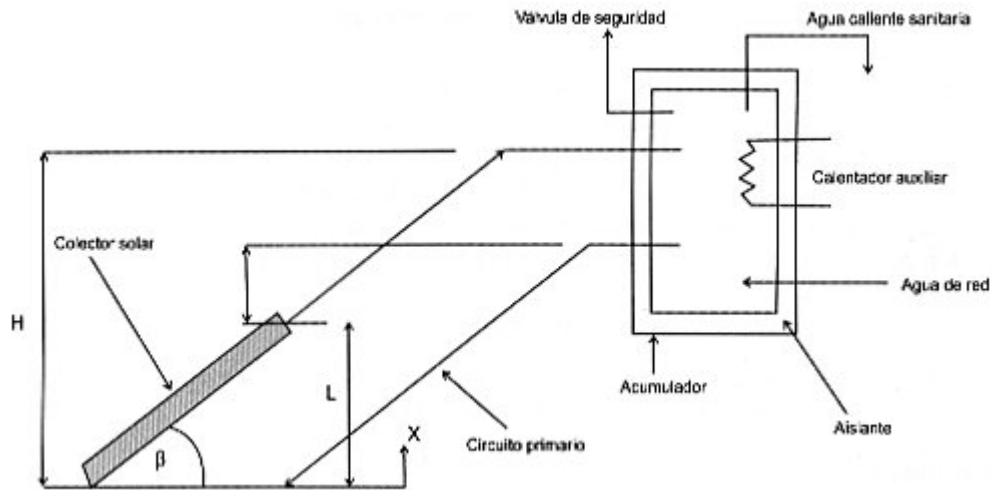


Figura 2.3 Diagrama de un sistema por termosifón.

2.2.2 Circulación forzada.

En los sistemas en que por diversas circunstancias no pueden instalarse sistemas de termosifón, el flujo del fluido se produce mediante un electrocirculador o bomba circuladora eléctrica, de tal forma que es necesario un control diferencial de temperaturas para su activación. Figura 2.4.

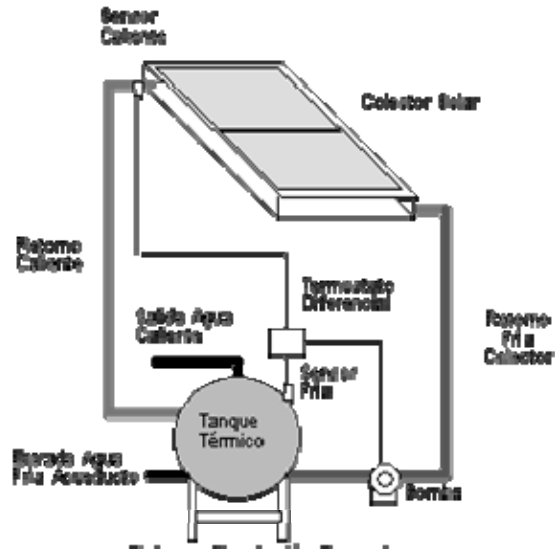


Figura 2.4 Diagrama de un sistema por circulación forzada.

En estas instalaciones y debido a las ventajas que aporta, casi siempre se utiliza doble circuito con intercambiador ya sea en el interior del acumulador o en su exterior, permitiendo por su versatilidad la utilización de una gran variedad de acumuladores y captadores así como la orientación de estos últimos pueden ser vertical u horizontal.

Las pérdidas de carga no serán un elemento tan limitante aunque se habrán de cuantificar cuidadosamente para la elección de la bomba utilizada.

2.3 Acumulador

Es el elemento de la instalación donde se acumula la energía térmica que se produce en el campo de colectores en forma de fluido caliente. Esta acumulación es necesaria porque la disponibilidad energética no coincide temporalmente con la producción, de tal forma que se hace imprescindible en elemento capaz de conjugar ambas situaciones y por lo tanto que haga frente a la demanda en momentos de poca o nula insolación.

2.4 Fluido caloportador

Es el fluido encargado de transferir la energía térmica desde el absorbedor hasta el depósito acumulador.

Si el fluido es agua natural este se utiliza en circuitos abiertos, donde el agua caliente sanitaria pasa directamente por los colectores, pero también puede ser utilizado en circuitos cerrados en lugares donde no haya peligro de heladas o exista un sistema de *protección antiheladas* adicional. En el primer caso es preceptivo la utilización de materiales permitidos para la conducción de agua potable. En cualquier caso y de cara a reducir la acumulación de depósitos de calcio en el interior de las conducciones del absorbedor es recomendable la instalación de un sistema activo (magnético) de reducción de depósitos calcáreos.

2.5 Aislamientos

El aislamiento *térmico* de equipos y tuberías cumple con la función de reducir la transferencia de calor entre el fluido y el ambiente con objeto de aumentar la eficiencia global de la instalación y el ahorro de energía.

2.6 Descripción de la instalación en la Torre de Ingeniería

Nuestra instalación cuenta con 70 colectores solares y 4 tanques de almacenamiento, cada sistema cuenta con una bomba, la cual hace circular el agua en los colectores y regresarla al tanque de almacenamiento.

Del lado oriente (este) cuenta 30 colectores; los cuales 18 abastecen a un tanque y los 12 restantes a otro. Estos colectores presentan una inclinación de 21° aproximadamente.

Del lado poniente (oeste) cuenta con 40 colectores, los cuales 20 abastecen a un tanque y los otros 20 a otro. Estos colectores presentan una inclinación de 23° aprox.

3. Antecedentes

La demanda de refrigeración incremento debido al almacenaje de comida y vacunas como necesidad básica, para el confort humano y el desarrollo de tecnología.

La escasez regional de electricidad forzó que el precio de la electricidad se elevara. El calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono son el principal problema del medio ambiente.

A principios del siglo XX, muchos países estuvieron interesados en utilizar energía solar pero la tecnología fue enfocada solo en calentar aire o agua.

La investigación de refrigeración solar fue incrementada a partir de 1965. Durante la crisis de energéticos en 1973, los sistemas de aire acondicionado eran considerados lujosos e innecesarios. La atención estuvo enfocada en la mejora de diseños y eficiencia de los sistemas de refrigeración.

3.1 Refrigeración solar activa

El uso de la energía solar activa para la extracción de energía térmica de un medio ha sido ampliamente desarrollado haciendo especial hincapié en el campo de la conservación de alimentos y en el acondicionamiento de espacios habitados.

La refrigeración con energía solar es una idea especialmente atractiva si consideramos dos circunstancias: Por una parte, las cargas de refrigeración están en fase con la captación de radiación solar. La carga de refrigeración de un espacio es la tasa a la que se ha de extraer la energía de su interior para mantenerlo en condiciones de temperatura y humedad determinadas para obtener el confort deseado. Esta carga depende de muchos factores, por ejemplo: radiación solar, fuentes de calor internas, temperatura y humedades interiores y exteriores, etc.

La figura 3.1 muestra países alrededor del mundo que actualmente tienen instalados sistemas de refrigeración utilizando colectores solares, para acondicionamiento de aire. La mayoría de ellos son utilizados en Alemania o España.¹

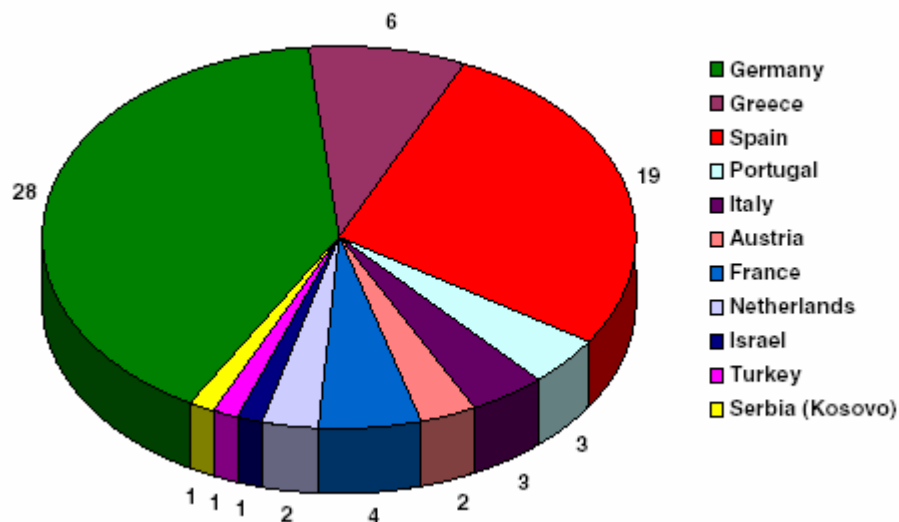


Figura 3.1. Resumen de los sistemas instalados en el mundo.

La potencia de refrigeración de todos estos sistemas es aproximadamente mayor a 6.3 MW y el área total de los colectores es acerca de 17500 m².

En la figura 3.2 se observa que el 59% de los sistemas utilizan chillers de absorción. Cerca del 11%, utilizan chiller de adsorción y aproximadamente el 23% de las instalaciones utilizan el sistema desecante con la rueda de absorción. Y solo el 6% de todas estas instalaciones utiliza la tecnología de desecante líquido lo cual aún continúa en un nivel bajo comercialmente.

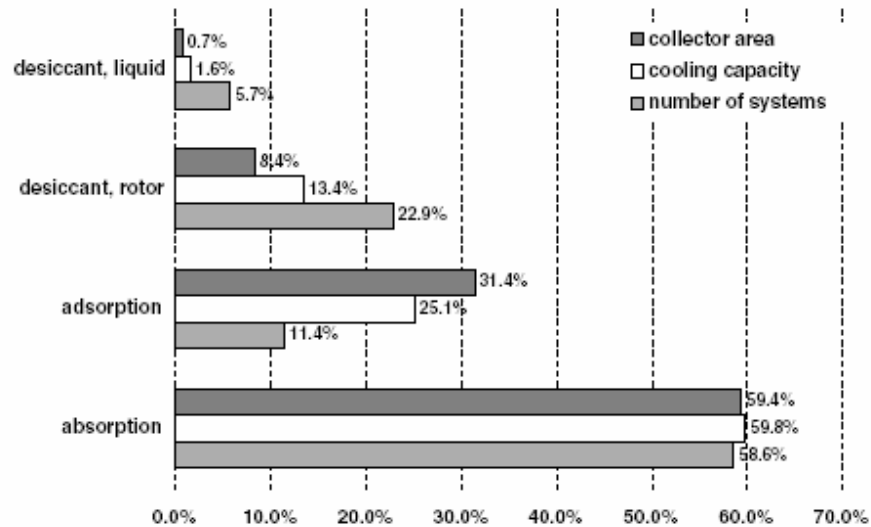


Figura 3.2 Utilización de los diferentes sistemas de refrigeración solar.

La congelación, refrigeración y el acondicionamiento de aire a partir de energía solar puede obtenerse por métodos muy diversos. (Figura 3.3).

El método más ampliamente extendido de refrigeración y acondicionamiento de aire emplea un *ciclo de compresión de vapor*, el ciclo de refrigeración por compresión de vapor requiere una entrada de energía importante en el compresor. En el ámbito de energía solar, si esta energía es eléctrica será suministrada por un generador fotovoltaico, si es mecánica provendrá de una máquina movida con energía solar térmica.

Existe un amplio abanico de métodos que permiten cubrir el congelamiento, la refrigeración y el acondicionamiento de aire a partir de la energía solar.

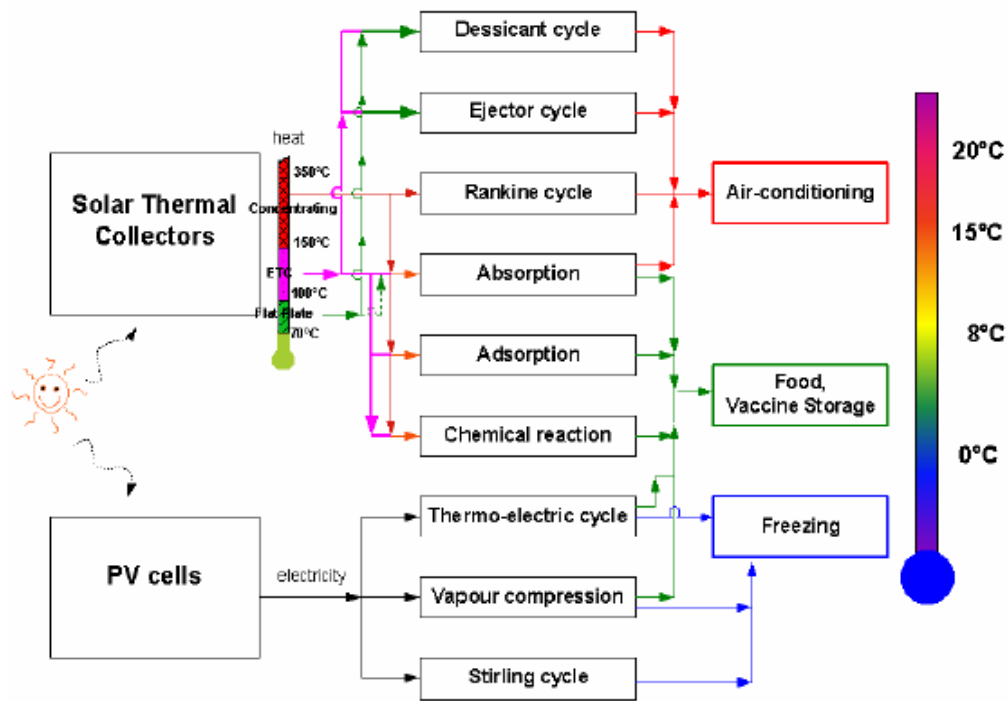


Figura 3.3 Métodos de refrigeración mediante energía solar.ⁱⁱ

3.2 Ejemplo de un sistema desecante en Alemaniaⁱⁱⁱ

En Freiburg Alemania, una Universidad está operando un sistema desecante instalado en el área de reuniones y cafetería del edificio, utilizado para aire acondicionado (figura 3.4).

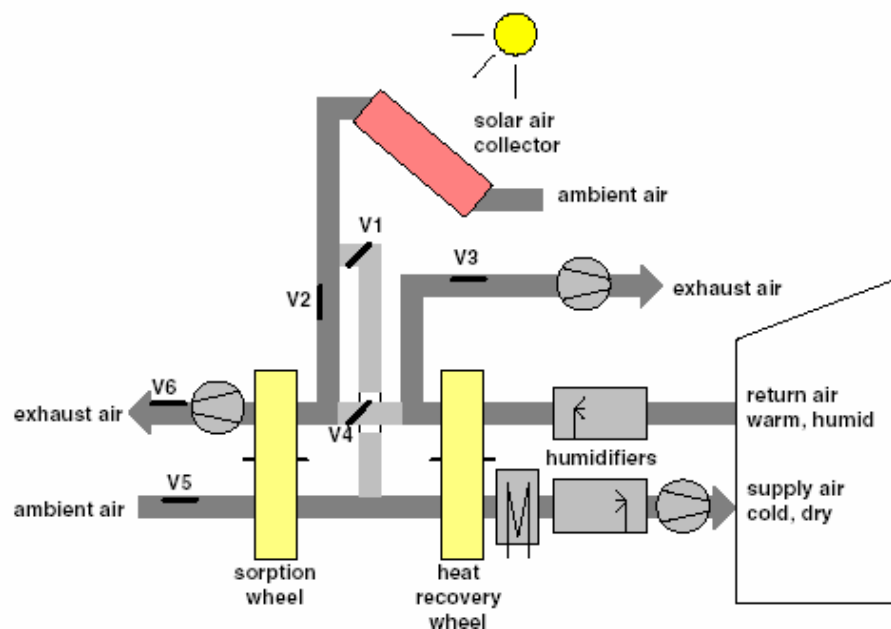


Figura 3.4 Esquema del sistema desecante instalado en el edificio de la Cámara de Comercio en Freiburg Alemania

Este sistema consiste de una unidad desecante utilizando una rueda de sílica gel, con un flujo de entrada de aire nominal de $10,200 \text{ m}^3/\text{h}$ y 100 m^2 de área de colector solar de aire para regenerar el material desecante. (Figura 3.5).

3.3 Aplicaciones de Refrigeración solar en México. Sonntlan Mexicali^{iv}

El proyecto de Refrigeración solar, consistió en un proyecto de aire acondicionado solar, consistente en acondicionar 6 casas unifamiliares, cinco de ellas “pegadas” una a la otra y una separada. Todas incorporaban elementos pasivos para reducir la carga térmica y una torre de máquinas que contenían los componentes del sistema solar activo. Los colectores se instalaron en la azotea de las casas. La carga de enfriamiento reducida de 7 kW (contra un valor de 18 kW para una casa normal en Mexicali), era cubierta por un *sistema de absorción* ARKLA-WFB 300 sol/aire de 90 kW de bromuro de litio/agua. El agua de enfriamiento se enviaba primero a un tanque de agua fría y después se distribuía a las manejadoras de aire instaladas en el techo de cada. La tabla 3.2 muestra los datos técnicos de cada sistema.



Figura 3.5 Sistema colector solar de aire instalado en la Cámara de Comercio en Freiburg Alemania.

TABLA 3.2

Sistema refrigeración solar por absorción BrLi/agua instaló en Mexicali, BC, México.

<u>Solar Collector System</u>	
Flat plate collectors (288 modules of 1.1 m ² each)	316 m ²
Operation temperature summer	70-90 °C
Heat storage capacity (2 tanks)	30 m ³
Thermal gain in summer	up to 1800 kWh/day
Heat transport and storage medium	water
<u>Air Conditioning System</u>	
Arkla-WFB 300 Solaire absorption chiller	max. 90 kW
Temperature hot water	70-90 °C
Temperature chilled water	min 7-11 °C
Temperature cooling water	25-28 °C
Capacity of wet cooling tower	max. 200 kW
Cooling load in summer	up to 500 kWh/day
Air handling units	1 in each house (6)
Air outlets/inlets	1 in each floor (12)

ⁱ P. Lamp and F. Ziegler, "European research on solar-assisted air conditioning", 14 January 1998

ⁱⁱ Wimolsiri Pridasawas and Per Lundqvist, "Technical options for a solar-driven cooling system", Royal Institute of Technology, Stockholm. 2003.

ⁱⁱⁱ Hans-Martin Henning, "Solar assisted air conditioning of buildings – an overview", Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany; accepted 27 July 2006.

^{iv} R. BEST and N. ORTEGA, "SOLAR REFRIGERATION AND COOLING", Posgrado en Energía Solar, UNAM, 1998 Elsevier Science.

4. Operación de los sistemas de refrigeración solar

La operación del sistema de refrigeración es presentado por el coeficiente de operación COP (coefficient of performance). Este muestra que tanto calor puede ser removido de la región a refrigerar (Q_e) por unidad de trabajo eléctrico o térmico (Q_g o W).

$$COP = \frac{Q_e}{W}$$

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g}$$

Para los sistemas de refrigeración solar, la operación puede ser escrita por el producto del COP y la eficiencia del colector (η_c). Además puede definirse para los sistemas térmicos, el cociente del efecto de la refrigeración y la energía solar de entrada (I), llamado STR (system thermal ratio).

$$\eta_{\text{system}} = COP \times \eta_c$$

$$STR = \frac{Q_e}{I \cdot A} = \frac{Q_e}{Q_g} \times \frac{Q_g}{I \cdot A} = COP \times \eta_c$$

Los tipos de sistemas de refrigeración solar, los COP's, posibles fluidos de trabajo y las aplicaciones se muestran en la tabla 4.1.

Nos enfocaremos en las tecnologías para acondicionamiento de aire mediante energía solar térmica sin previa transformación en energía mecánica, basadas en los fenómenos de sorción, en reacciones químicas.

En climas húmedos, la extracción de la humedad contenida en el aire representa la mayor carga de refrigeración. En estos climas se pueden utilizar sistemas desecantes de sorción para retirar la humedad del aire, la energía solar también puede cubrir la mayor parte de la demanda energética de estos dispositivos.

4.1 Desecación

Especialmente en regiones húmedas y cálidas la carga de calor latente para el acondicionamiento de aire se puede reducir mediante sustancias que dada su avidéz por el vapor de agua desecan el aire. La avidéz que muestran sustancias, sólidas o líquidas, por el vapor de agua se conoce como sorción. Existen sistemas de refrigeración de ciclo abierto que sacan provecho de la sorción; estos se conocen como sistemas de acondicionamiento de aire por desecación.

4.1.1 Los fenómenos de la adsorción y la absorción

La *adsorción* es un fenómeno natural en el cual átomos o moléculas de una sustancia se concentran en la superficie de otra (figura 4.1). Este fenómeno difiere de la *absorción* en el

hecho que en esta última las sustancias absorbidas entran en la red cristalina del material absorbente. La adsorción emplea la atracción física entre el vapor de una sustancia y los lugares activos de la superficie adsorbente mientras que la absorción emplea una reacción química para capturar el vapor. Ambos fenómenos se producen sobre sustancias líquidas y sólidas. En ocasiones se nombrarán indistintamente como sorción dado que en ingeniería ambos fenómenos se aplican de forma análoga.

TABLA 4.1
Aplicaciones, COP y fluido de trabajo de los sistemas de refrigeración solar.

<i>Thermal-driven systems</i>				<i>Applications</i>	
Systems	Gen./ Regen. Temp. (°C)	COP _{cycle} ^c	Working Fluid	Refrigeration	A/C
Absorption	80-190	0.6-0.8 (single stage) ≤ 1.3 (2 stages)	NH ₃ /H ₂ O, H ₂ O/LiCl, H ₂ O/LiBr	✓	✓
Adsorption	80-300	0.3-0.8	H ₂ O-Zeolite, Methanol- Activated Carbon	✓	
Chemical reaction	80-300	0.1-0.2	NH ₃ /SrCl ₂	✓	
Duplex- Rankine	>120	0.3-0.5	water, R114, Toluene, Organics fluid		✓
Desiccant	40-100	0.5-1.5	water		✓
Ejector	80-150	0.3-0.8	water, butane, R141b, etc.		✓

<i>Electricity-driven systems</i>				<i>Applications</i>	
Systems	Power for 1 W of the cooling effect (W)	COP _{cycle} ^c	Working Fluid	Refrigeration	A/C
Vapor- compression	12-50	3 - 5	R134a, R290, etc.	✓	
Thermo- electric	a few W	0.5 ^a	-	✓	
Stirling	3 - 17	3 ^b	He, H ₂ , N ₂	✓	

a: International Institute of Refrigeration (IIR), (1999)., based on the sunlight of 5 kWh/m² day

*a**: International Institute of Refrigeration (IIR), (1999)., based on the theoretical calculation of ETC solar collector surface of 1.8-1.2m²/kWh day, chilling at -5°C and condensation temperature at 35°C.

b: Globalcooling, (2001)

c: COP of the refrigeration sub-system.

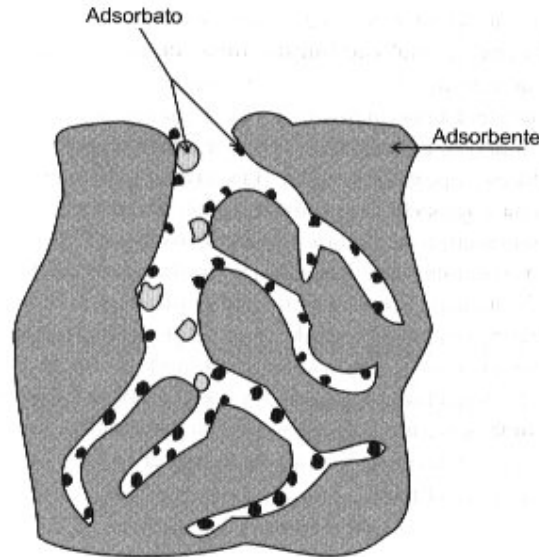


Figura 4.1 Adsorción en sólido poroso.

La primera experiencia de refrigeración utilizando el fenómeno de la sorción data de 1824 y fue descrita por el eminente físico Michael Faraday, Faraday trató de licuar ciertos gases que algunos científicos proponían que sólo podían existir en forma de vapor. El científico sabía que el cloruro de plata, un polvo blanco, podía absorber grandes cantidades de vapor de amoníaco.

La tecnología ha madurado considerablemente desde los tiempos de Faraday. Hoy en día se dispone de equipos e instalaciones comerciales que basándose en el mismo fenómeno de la sorción procuran aire o agua enfriados para acondicionar o refrigerar los espacios.

4.2 Refrigeración por adsorción

Se conoce como sistemas de refrigeración por adsorción a las máquinas de refrigeración que trabajan en ciclo cerrado con sorbentes sólidos.

4.2.1 Desecantes sólidos

Un método clásico para desecar el aire consiste en poner en contacto directo una corriente de aire a tratar con un material adsorbente de elevada afinidad por el vapor de agua. La humedad es absorbida por el *desecante sólido* y el aire aumenta su temperatura debido a la energía liberada en la adsorción. Posteriormente, el desecante se regenera calentándolo y cediendo la humedad que contiene a otra corriente de aire. Algunos desecantes sólidos clásicos son el sílica gel, la alúmina, las sales de cloruro de litio y el cedazo molecular.

La figura 4.2 muestra la capacidad de adsorción de agua de diversas sustancias desecantes. Se presenta en peso de agua adsorbida en función de la humedad del aire. El tamiz

molecular tiene la mayor capacidad hasta una humedad del aire del 30% mientras que el sílica gel es óptimo entre el 30 y el 75%, humedades típicas en el ambiente de los edificios.

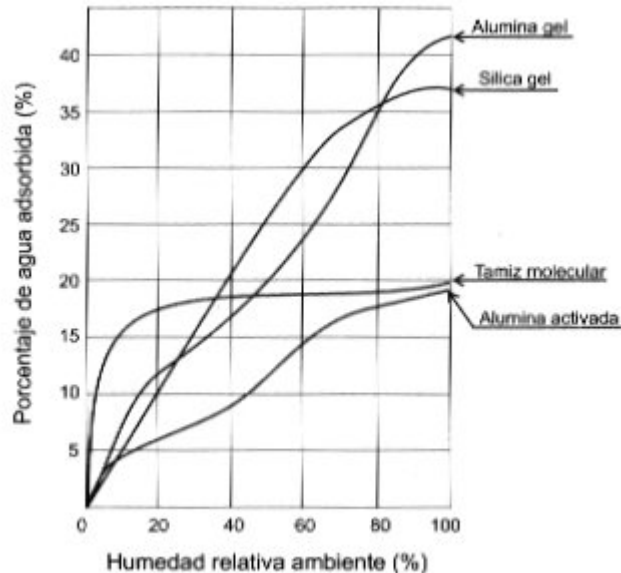


Figura 4.2 Capacidad de adsorción en equilibrio de algunos desecantes.

La sustancia más aplicada, el sílica gel, tiene una estructura de micro poros amorfos con una distribución de tamaño de las aberturas entre 0.3 y 6nm. Estos poros interconectados dan lugar a una superficie que atrae y contiene el agua por adsorción y condensación capilar, permitiendo al sílica gel incorporar en agua hasta un 40% de su peso. El sílica gel es extremadamente eficiente a temperaturas por debajo de 25° C pero pierde parte de sus propiedades cuando la temperatura se empieza a elevar. La popularidad de esta sustancia también se basa en otras propiedades, no es corrosiva, no es tóxica y es permitida en aplicaciones cosméticas y alimentarias.

La tecnología de las *ruedas desecantes* de la que se encuentran diferentes modelos comerciales, se ha basado en los sólidos desecantes. (Figura 4.3) el aire entra en la rueda giratoria desecante. Como la rueda está formada por sustancias adsorbentes el aire que la cruza pierde humedad y se calienta, incorporando el calor liberado por el adsorbente en el proceso de adsorción. Simultáneamente, en otra sección de la rueda la sustancia absorbente se regenera. El aire, seco y cálido, empleado para la regeneración puede ser calentado de diferentes formas, entre ella en colectores solares térmicos. Las ruedas desecantes habitualmente giran a velocidades entre 2 y 30 revoluciones por hora.

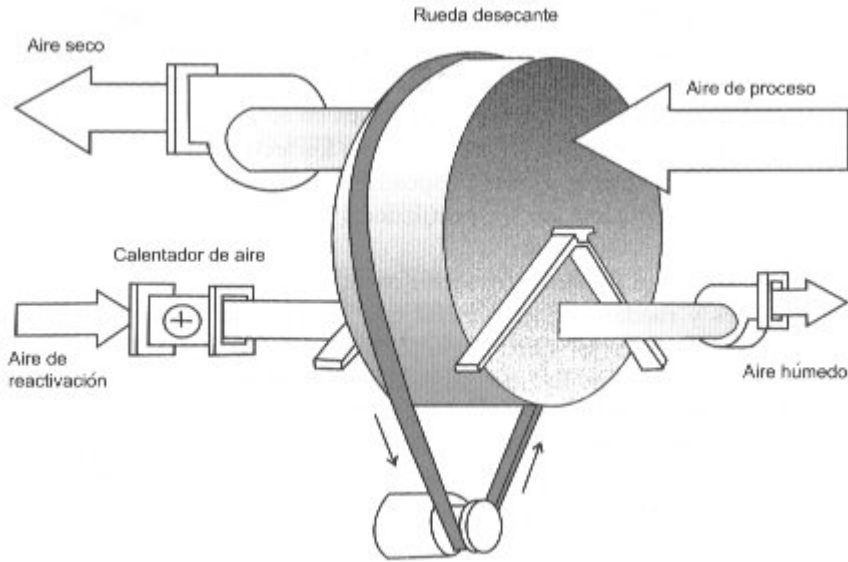


Figura 4.3 Esquema de operación de una rueda desecante.

Hacia los mediados de los 60 el australiano Dunkle propuso un método de aire acondicionado que utilizaba colectores solares térmicos y un lecho rocoso como sistema de almacenamiento de energía. (Figura 4.4).

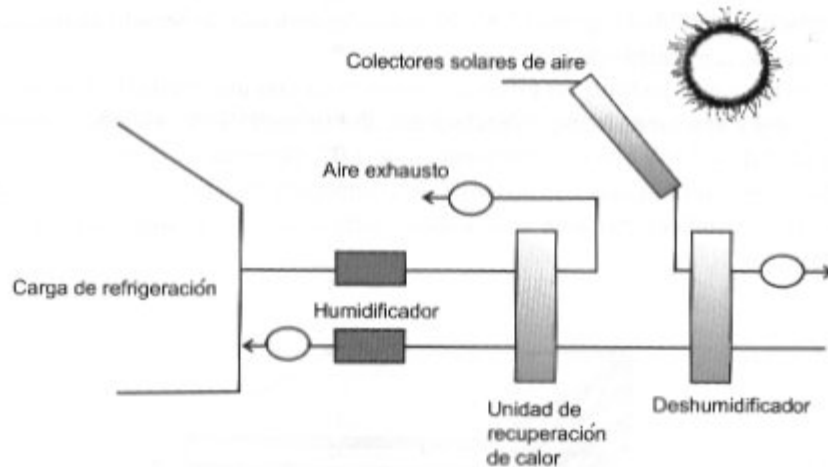


Figura 4.4 Esquema de un primer sistema de desecación.

La corriente de aire a tratar se desecaba haciéndola circular a través de un sistema desecante de sílica gel que giraba lentamente. Posteriormente dos ruedas giratorias se utilizan para extraer calor de la corriente. Finalmente un dispositivo evaporativo permitiría disminuir la temperatura del aire exterior calentado en colectores solares para regenerar el sílica gel.

Pocos años más tarde Munters en Suecia mejoró las ruedas desecantes introduciendo una matriz desecante con túneles paralelos. La rueda mejorada de Munters fue la base de los

trabajos que desarrolló el Institute of Gas Technology en EE.UU. El año 1970 el Institute of Gas Technology rediseñó su sistema de gas para utilizar energía solar. En esta época los desecantes eran principalmente de aplicación industrial. Hacia finales de los 70, el interés público en el tema energético dirigió el trabajo de los investigadores a las aplicaciones de materiales desecantes en acondicionamiento de aire en espacios comerciales y residenciales. La mayoría de los lechos o ruedas desecantes de aquel tiempo utilizaban gel sílica. Estos dispositivos provocaban pérdidas de presión tan importantes que las potencias de los ventiladores necesarias no las hacían competitivas en sistemas de aire acondicionado.

En los años 90 salió al mercado un dispositivo rotativo de silicato de titanio (considerado Tipo 1M) con conductos hexagonales. Otro método reciente para extraer calor latente y sensible a partir de un lecho desecante se basa en láminas plano paralelas. El intercambiador utiliza láminas de Teflón impregnadas de sílica gel o cedazo molecular para absorber la humedad (figura 4.5). El calor del proceso de secado es retirado por una corriente de aire perpendicular al procesado.

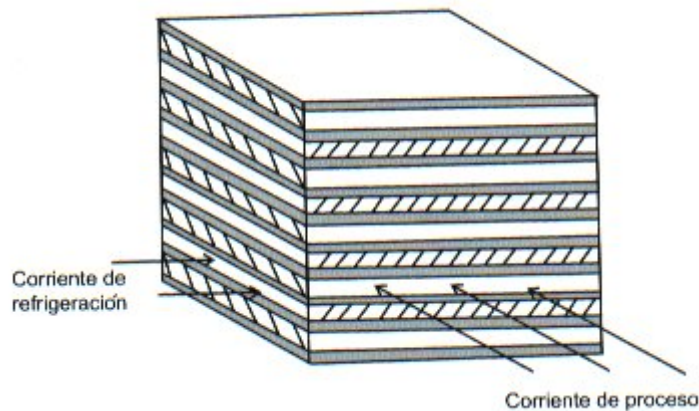


Figura 4.5 *Dispositivo desecante de láminas.*

El solar Research Institute ha estudiado un sistema con una rueda de 1m de diámetro de sílica gel y una rueda intercambiadora de calor de un 95% de eficiencia obteniendo una capacidad de 4.7 kW con un COP térmico de 1.07.

4.4.2 Operación de los sistemas desecantes sólidos

La aplicación de los materiales desecantes en el acondicionamiento de aire requiere del proceso esquematizado en la figura 4.6. El *diagrama psicrométrico* indicando las diferentes condiciones de temperaturas y humedad del aire en una máquina de acondicionamiento por desecación se muestra en la figura 4.7.

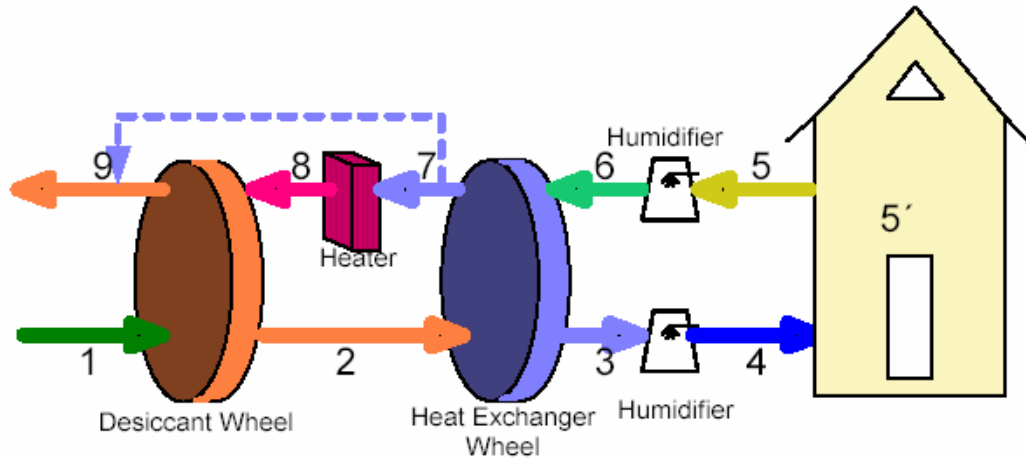


Figura 4.6 Esquema de operación de un sistema de desecación.

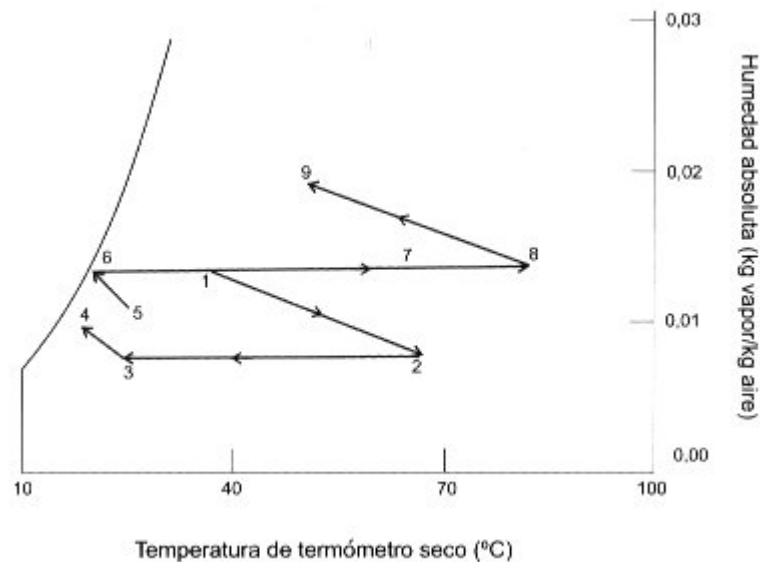


Figura 4.7 Diagrama psicrométrico del proceso de desecación.

Las etapas enumeradas en las figuras 4.6 y 4.7 se desarrollan de la siguiente forma:

1. El aire exterior caliente y húmedo atraviesa una rueda giratoria de materiales desecantes que adsorben la humedad.
2. El aire deja la rueda más seco y caliente porque la energía asociada con la adsorción del vapor es transferida al mismo aire.
3. El aire cálido atraviesa un intercambiador de calor rotatorio, provocando un intercambio entre el aire cálido y el aire húmedo fresco que proviene del interior del espacio a acondicionar.
4. El aire fresco y seco atraviesa un acondicionador evaporativo intercambiando calor sensible por calor latente. El aire se enfría y humedece.

En sentido contrario al proceso descrito se encuentra que:

5. El aire exhausto del interior, fresco y relativamente seco, entra en el mismo sistema evaporativo.
6. El aire ya húmedo y enfriado atraviesa la rueda intercambiadora de calor ganando calor sensible.
7. Esta corriente cálida entra en un dispositivo calefactor que eleva su temperatura disminuyendo su humedad relativa. El agua calentada en colectores solares provee la energía para este calefactor.
8. El aire caliente con humedad relativa baja entra en la rueda desecante y evapora el agua que ha sido adsorbida en la primera etapa de este esquema.
9. Aire ya exhausto se desecha en el exterior.

4.3 Elección del sistema de refrigeración solar

El problema radica en elegir que tipo de sistema es conveniente utilizar para nuestro problema de acondicionamiento de aire. De acuerdo a las siguientes ventajas se elige un sistema desecante:

- 1) Solo se requiere de calor y agua para poder operar el sistema. La planta solar nos genera el calor térmico necesario; el agua, fluido de trabajo, nos hace amigable el sistema al medio ambiente, es decir, el único refrigerante utilizado es agua, por lo que no se tienen gases u otros tipos de sustancias las cuales, pueden provocar molestia o inseguridad para los habitantes de la torre de ingeniería.
- 2) La máquina necesaria no requiere de gran espacio, esta ventaja es muy importante pues en el nivel terraza no disponemos de él.
- 3) El sistema se puede integrar para que opere como calefacción, lo que es otra ventaja grandiosa ya que aparte de acondicionar, podemos tener calor en épocas frías del año.

5. Cálculo de calor generado por la planta solar

Para determinar la cantidad de calor generada en la planta se utilizo el programa, “Simulador de un destilador solar de multietapas” basado en CSADI ver. PC BASIC 08/89. José Luis Fernández Zayas, instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Para este caso solo se utilizó una parte del programa, la solución del sistema solar, el cual incluye el conjunto de captadores, bomba, tanque y tuberías.

5.1 Datos requeridos para correr el programa

I Especificaciones del colector.

1) Numero de cubiertas.	1
2) Grueso de cada cubierta (cm.).	0.50
3) Coeficiente de extinción	0.32
4) Absortancia del colector	0.85
5) Reflectancia difusa	0.16
<i>A) Área total de captación. (m²).</i>	
7) Coeficiente de pérdidas térmicas (kW/m ² K)	0.0017
8) Exponente de pérdidas térmicas	1.157

II Datos solares y horas /modo de bombeo

<i>B) Numero de día [1-365]</i>	
2) Latitud [norte +] (°)	19.3
<i>C) Inclinación [0->90] (°)</i>	
<i>D) Azimut [este +] (°)</i>	
<i>E) Radiación horizontal global máxima (kW/m²).</i>	
<i>F) Radiación horizontal directa máxima (kW/m²).</i>	
7) Hora de arranque [AM +] (hrs.).	7
8) hora de paro [PM +] (hrs.).	18
9) Bombeo auto/manual (0/1).	0

III Datos térmicos y ambientales.

<i>G) Temperatura ambiente máxima (° C).</i>	
<i>H) Temperatura ambiente mínima (° C).</i>	
1) Temperatura tanque inicio (° C).	30
2) Masa total del sistema (kg.).	3000
3) Calor específico (kJ/kg °C).	4.18
<i>I) Flujo másico unitario (kg/s por m²).</i>	
4) Área total pérdidas tanque (kW/m ² °C).	8.9
5) Coeficiente global pérdidas tanque (kW/m ² °C).	0.01

La torre cuenta con 4 tanques los cuales hay dos del lado oriente y dos del lado poniente. Se usará la siguiente nomenclatura para ubicar rápidamente de que tanque estamos hablando.

Tanque I. Ubicado del lado oriente (este) conectado a 18 colectores térmicos.

Tanque II. ubicado del lado oriente (este) conectado a 12 colectores térmicos.

Tanque III. ubicado del lado poniente (oeste) conectado a 20 colectores térmicos.

Tanque IV. ubicado del lado poniente (oeste) conectado a 20 colectores térmicos.

Los datos indicados en la lista de datos requeridos son constantes, es decir, no cambian, independientemente del tanque que se trate. La tabla 5.1 indica los datos específicos independientes de cada tanque. Así como los datos térmicos y ambientales según sea el caso.

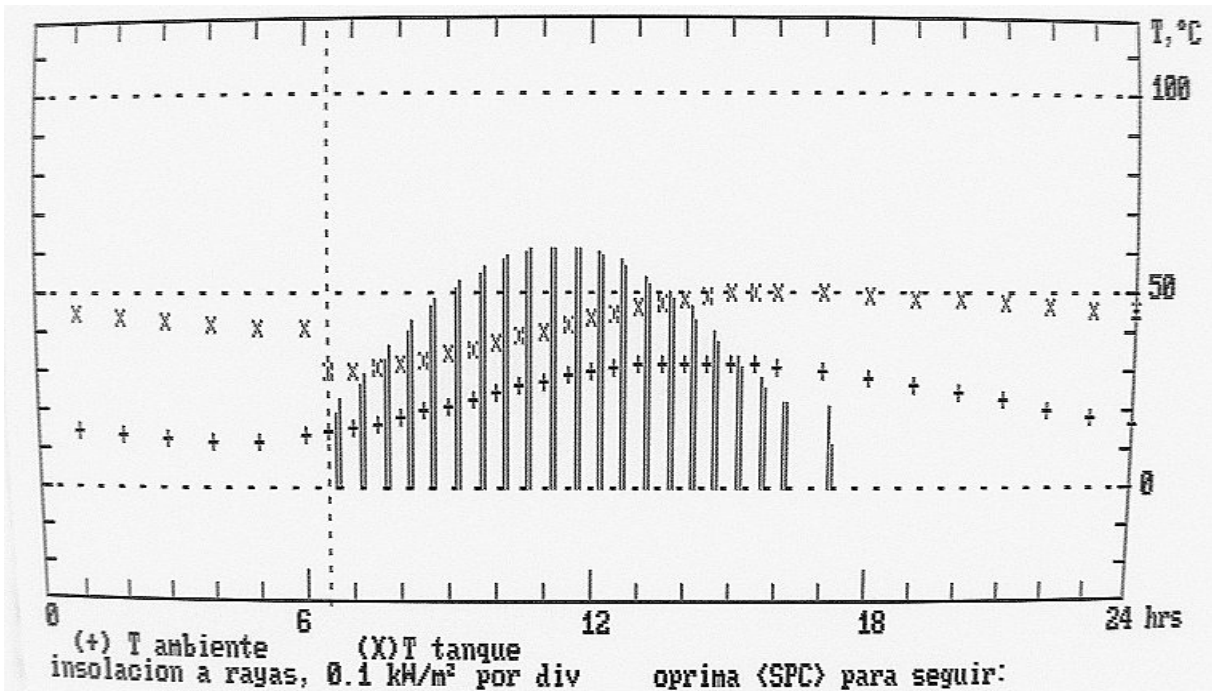
TABLA 5.1

Datos específicos. Especificaciones del colector, Datos solares, Datos térmicos y ambientales.

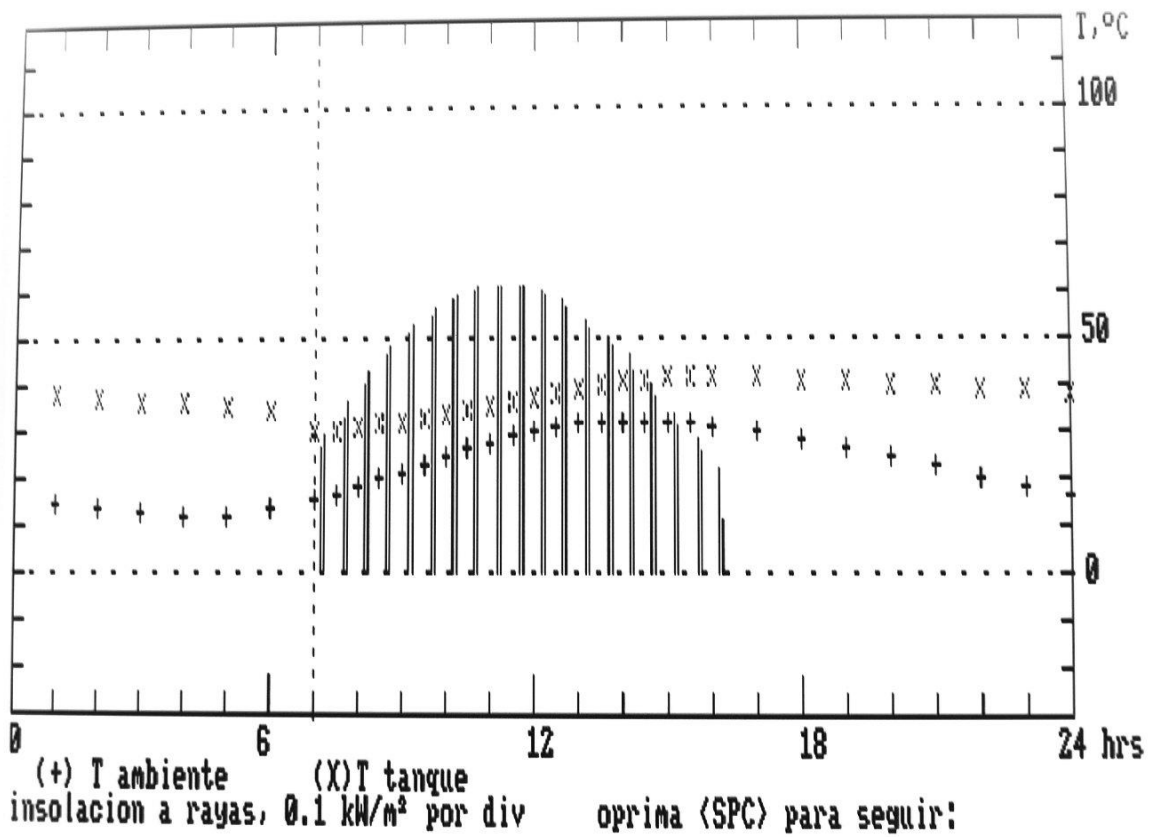
Tanque	A) Área total de captación. (m²).	B) Número de días [1-365]	C) Inclinación [0->90] (°)	D) Azimut [este +] (°)	E) Radiación horizontal global máxima (kW/m²).	F) Radiación horizontal directa máxima (kW/m²).	G) Temp. ambiente máxima (° C).	H) Temp. ambiente mínima (° C).	I) Flujo másico unitario (kg/s por m²).
Verano									
I	31.5	172	21.4	90	0.632	0.406	32	12	0.163
II	17.88	172	21.4	90	0.632	0.406	32	12	0.144
III	35.00	172	23.7	-90	0.632	0.406	32	12	0.122
IV	29.80	172	23.7	-90	0.632	0.406	32	12	0.144
Invierno									
I	31.5	356	21.4	90	0.571	0.396	26	2	0.163
II	17.88	356	21.4	90	0.571	0.396	26	2	0.144
III	35.00	356	23.7	-90	0.571	0.396	26	2	0.122
IV	29.80	356	23.7	-90	0.571	0.396	26	2	0.144

5.2 Gráficas en verano

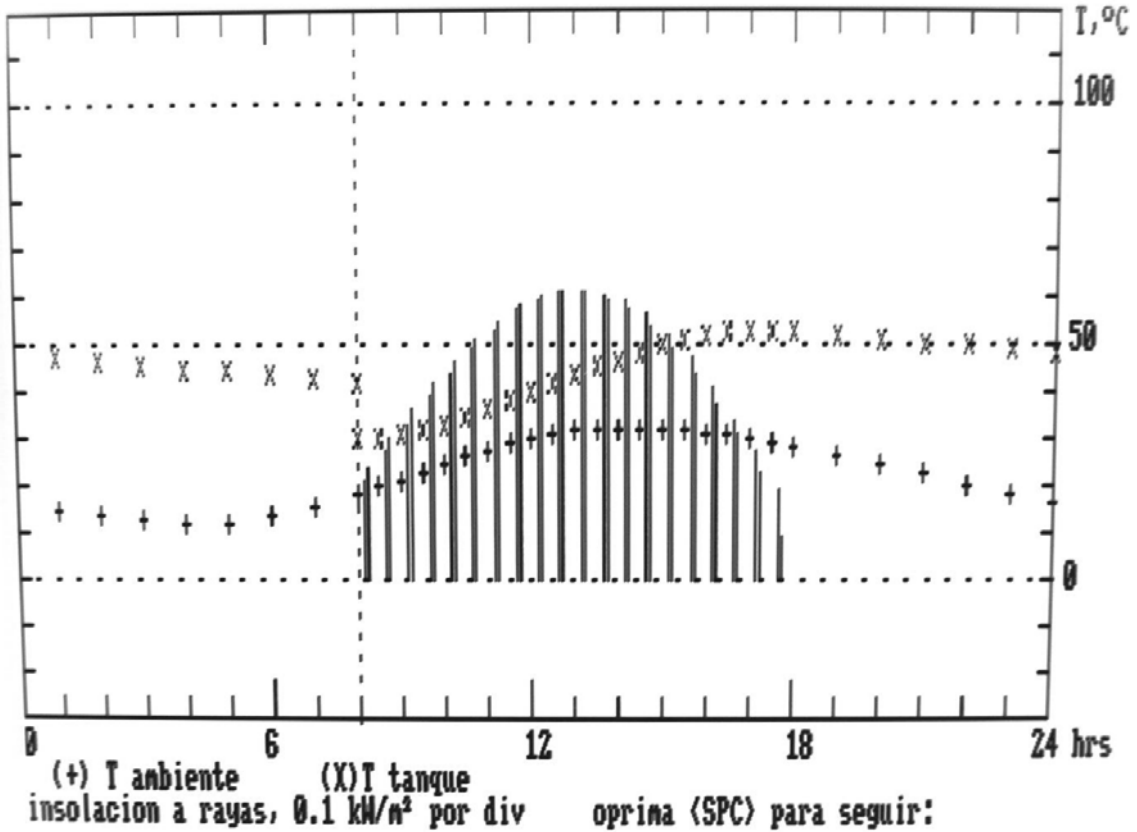
Las gráficas que se muestran a continuación, muestran la temperatura que obtendremos en los 4 tanques a través del día, en un día típico de verano (21 de junio).



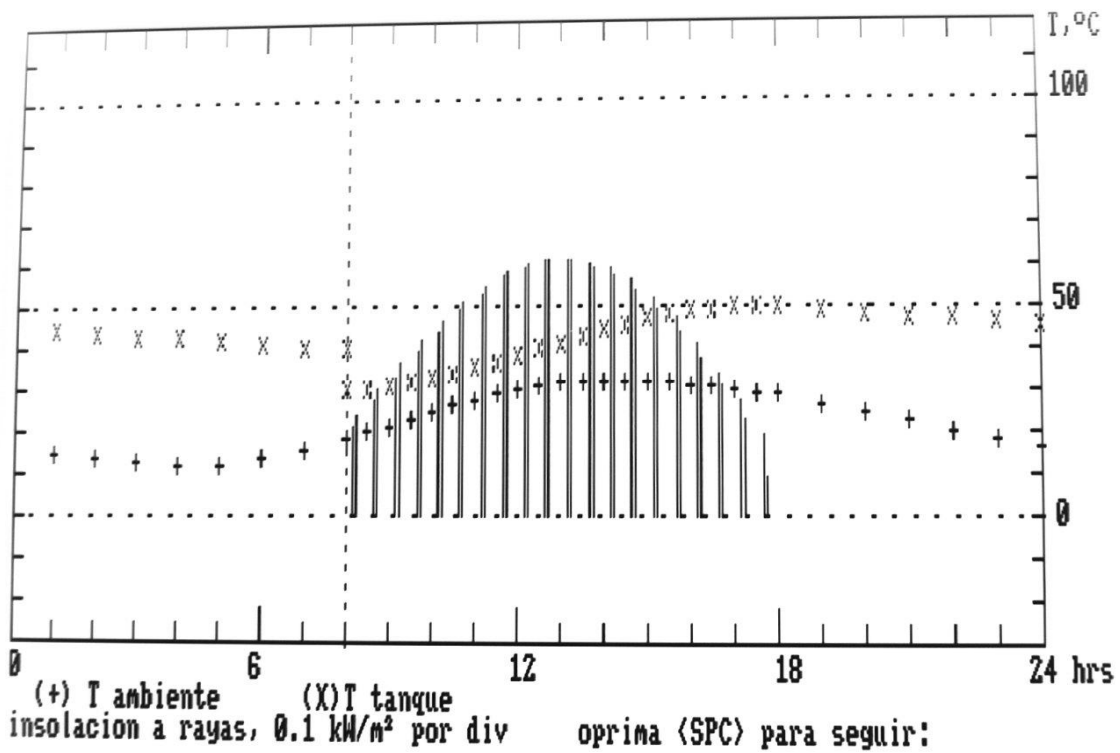
Gráfica 5.1 Temperatura en el tanque I vs. Horas del día.



Gráfica 5.2 Temperatura del tanque II vs. Horas del día.



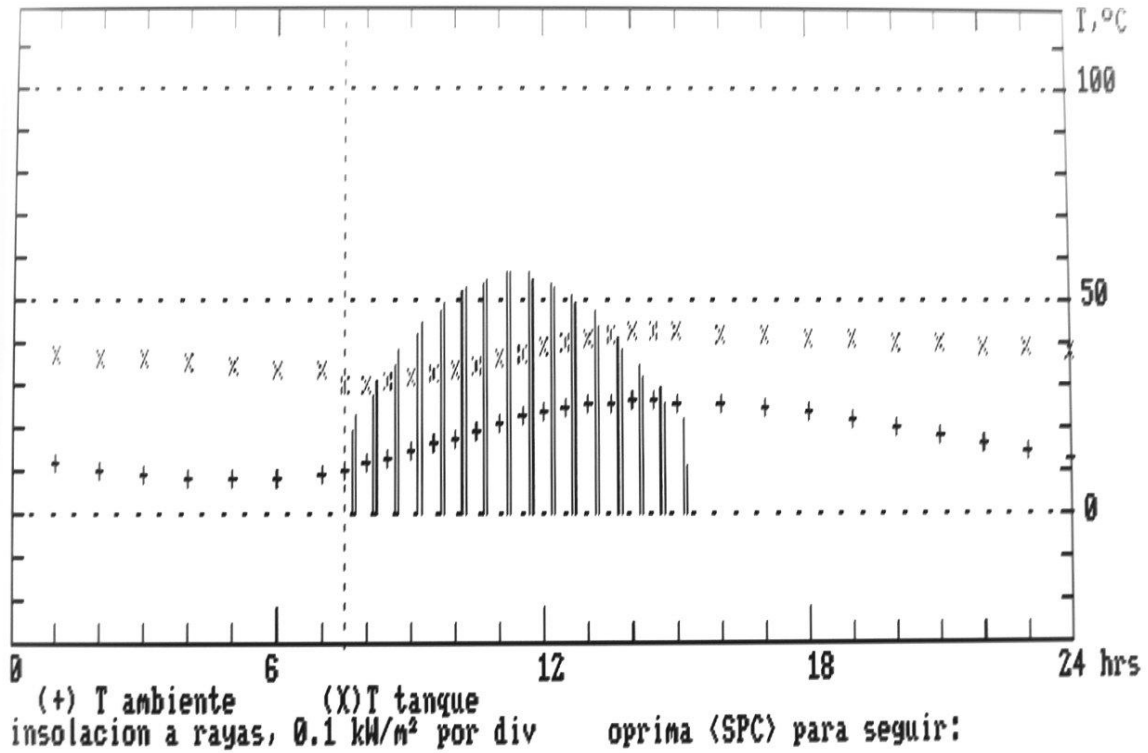
Gráfica 5.3 Temperatura en el tanque III vs. Horas del día.



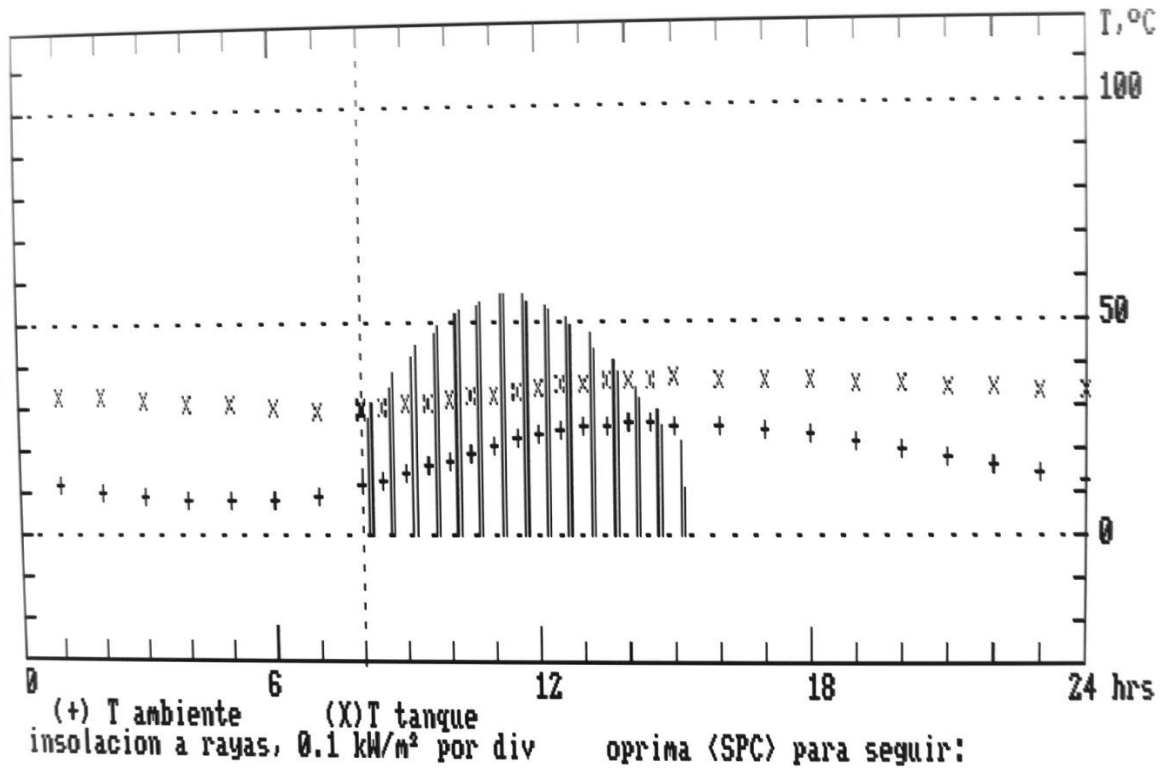
Gráfica 5.4 Temperatura del tanque IV vs. Horas del día.

5.3 Gráficas en invierno

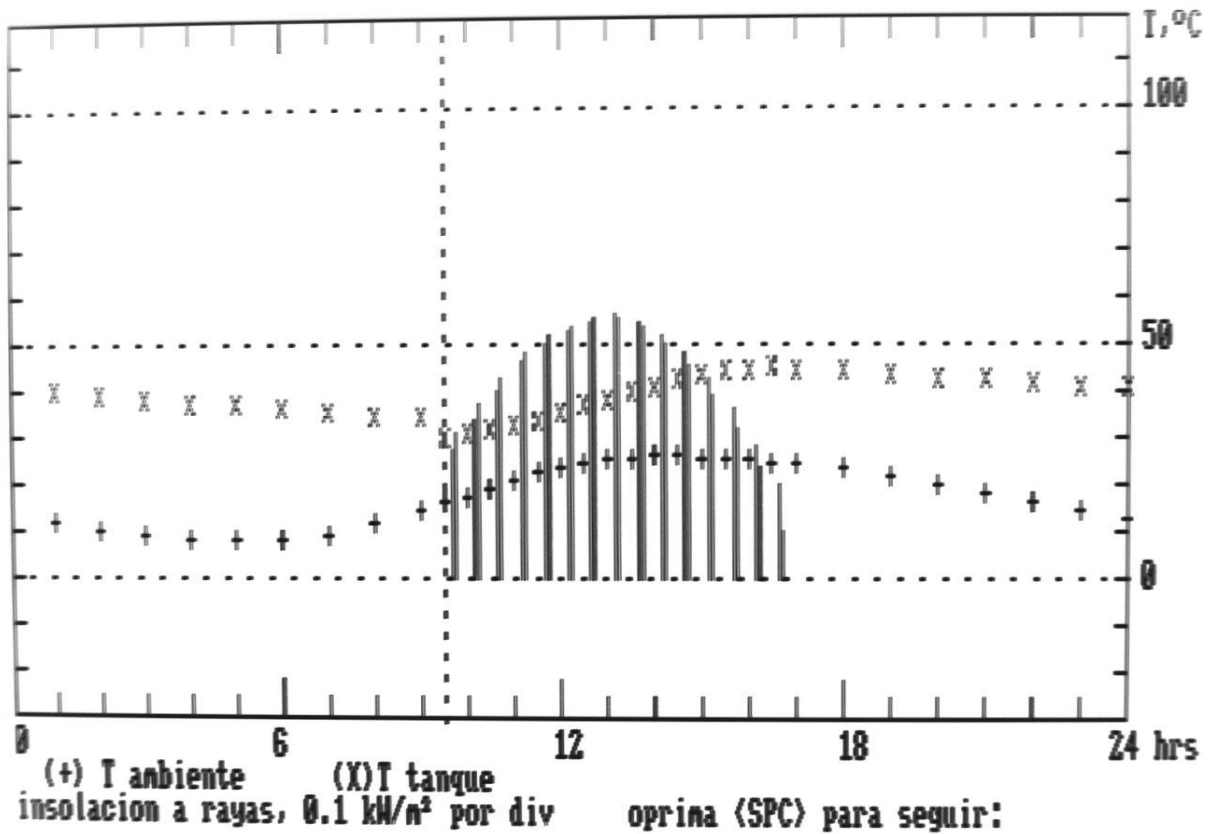
Las gráficas que se muestran a continuación, muestran la temperatura que obtendremos en los 4 tanques a través del día, en un día típico de invierno (22 de diciembre).



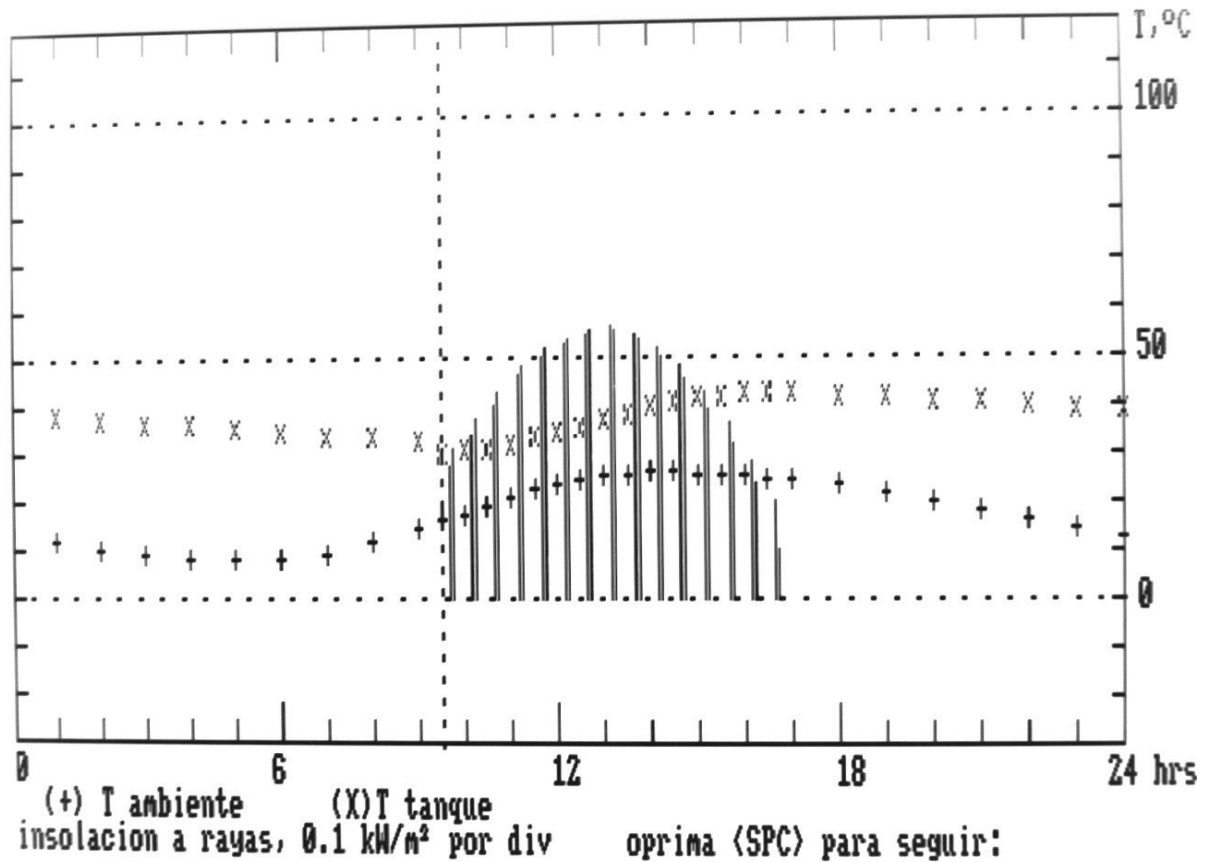
Gráfica 5.5 Temperatura del tanque I vs. Horas del día.



Gráfica 5.6 Temperatura del tanque II vs. Horas del día.



Gráfica 5.7 Temperatura del tanque III vs. Horas de día.



Gráfica 5.8 Temperatura del tanque IV vs. Horas del día.

5.4 Resultados en verano

TABLA 5.2

Temperaturas y calor máximo generado en los tanques en verano.

Verano					
Tanque	T inicio °C	T máxima °C	Hora de T máx. (hrs.)	Q gen. (kJ)	Q gen. (kWh/día)
I	30	50.1	15-17	252,415.80	19.49
II	30	41.7	15-17	146,928.60	11.35
III	30	52.9	16.5-18	287,578.20	22.21
IV	30	49.8	17-18	248,648.40	19.20
Total 4 Tanques					72.25

5.5 Resultados en invierno

TABLA 5.3

Temperaturas y calor máximo generado en los tanques en invierno.

Invierno					
Tanque	T inicio °C	T máxima °C	Hora de T máx. (hrs.)	Q gen. (kJ)	Q gen. (kWh/día)
I	30	42.7	15	159,486.60	12.32
II	30	36.8	16-17	85,394.40	6.59
III	30	45	18	188,370.00	14.55
IV	30	42.8	17	160,742.40	12.41
				Total 4 Tanques	45.87

6. Cálculo de Carga de Enfriamiento

6.1 Carga variable

La radiación solar no es constante, es una carga variable que depende de la estación del año. (Figura 6.1). La distancia entre el sol y la tierra es diferente en los cuatro puntos señalados, lo que hace que cambie la radiación solar en cada punto.

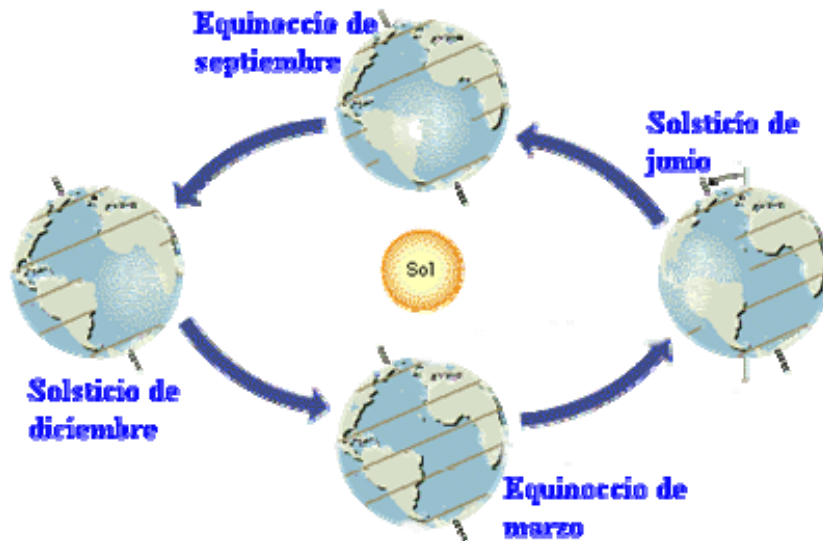
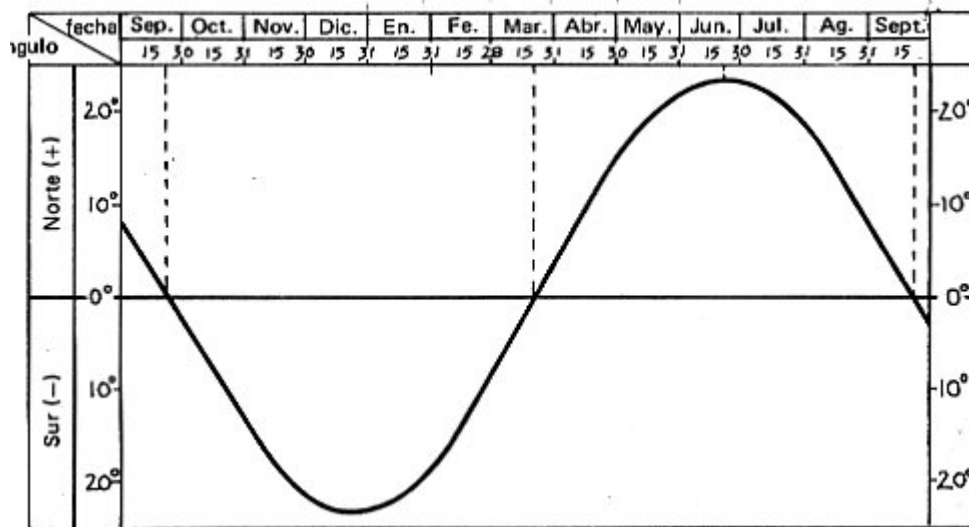


Figura 6.1 Puntos de solsticios y equinoccios a lo largo del año.

Otro factor que hace que la radiación cambie es el ángulo de inclinación de los rayos solares, que depende de la fecha que se encuentre la tierra en su vuelta anual. Gráfica 6.1.



Gráfica 6.1 Fecha del año vs. Ángulo de inclinación de los rayos solares en la tierra.

Es por eso que nuestras tablas de Factor de ganancia solar (FGS) presentan 7 fechas.

6.1.1 Carga de radiación solar a través de vidrios

La ganancia neta de calor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q = (FGS \times A \times CS \times FCE) / 852.5.$$

Donde:

Q = ganancia neta por radiación solar a través del vidrio (kW)

FGS = factor de ganancia solar. (kcal/hr m² °C).¹

A = área del vidrio (m²).

CS = coeficiente de sombreado.²

FCE = factor de carga de enfriamiento^b.

El valor 852.5 es para convertir kcal/hr a kW.

6.1.2 Conducción a través de muros y techos

El calor que pasa a través de muros y techos, se puede calcular con la ecuación

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

Donde:

Q = velocidad de transferencia de calor a través de la división (muro o techo).

A = área de la división (m²).

ΔT_{eq} = diferencia de temperatura equivalente entre los espacios sin acondicionar y los acondicionados.³

U = coeficiente global de transferencia de calor para la división (muro o techo).

Para determinar el coeficiente global de transferencia de calor se utiliza la expresión:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \dots + \frac{x_n}{k_n} + \frac{1}{h_1}}$$

Donde:

$h_0 = 29.3$ (kcal/hr m² °C) @ 24(km/hr)

$h_1 = 8$ (kcal/hr m² °C) @25-50(ppm)

¹ Normas para temperaturas de cálculo en los sistemas de acondicionamiento de aire y datos geográficos mas temperaturas extremas de los diferentes lugares de la República Mexicana. Norma AA-006-94-000

² Pita, E G, "Acondicionamiento de aire principios y sistemas", Tabla 6.7 y 6.8, reproducido con permiso del 1985 Fundamentals, ASHRAE Handbook & Product Directory.

³ Tabla de temperatura equivalente para muros y techos en G. Centígrados.

x = espesor del material (m)

k = conductividad térmica del material (kcal/hr m °C)

6.2 Carga constante

6.2.1 Carga debida al alumbrado

La ecuación para calcular la ganancia de calor debida al alumbrado es

$$Q = W \times FB \times FCE$$

Donde:

Q = ganancia neta de calor debida al alumbrado (kW).

W = capacidad del alumbrado (W)

FB = factor de balastro, toma en cuenta las pérdidas de calor en la balastro de unidades fluorescentes, valor típico $FB=1.25$ y $FB=1$ para incandescente.

FCE = almacenamiento de calor $FCE= 1$.^b

6.2.2 Carga debido a personas

La ganancia de calor debida a las personas se compone de dos partes: el calor sensible y calor latente que resulta de la transpiración. Las ecuaciones de ganancias de calor sensible y latente originado en las personas son:

$$Q_s = q_s \times n \times FCE$$

$$Q_l = q_l \times n$$

Donde:

Q_s, Q_l = ganancias de calor sensible y latentes.

q_s, q_l = ganancias de calor sensible y latentes por personas.⁴

n = numero de personas.

FCE = factor de carga de enfriamiento para las personas, $FCE=1$ si el sistema de aire acondicionado se apaga durante la noche.

6.2.3 Carga debido a equipo

La ganancia de calor debida al equipo se puede calcular en ocasiones en forma directa consultando al fabricante o a los datos de placa. Algunos equipos producen tanto calor sensible como latente.

⁴ De *Modern Air Conditioning, Heating and Ventilating*, por Willis H. Carrier, Realto E. Cherne, Walter A. Grant y William H. Roberts.

En la tabla IX-8 se muestran algunos valores de la producción de calor para aparatos eléctricos típicos.⁵

6.3. Cantidad de aire necesario

El aire suministrado debe tener una temperatura menor que la del espacio por condicionar, de tal modo que la ganancia de calor del aire sea igual a la ganancia de calor del espacio, la cuál se deberá a, al calor conducido a través de techos, muros vidrios, calor debido a personas, equipo, etc. La cual está representada por la suma de carga de refrigeración sensible y la carga de refrigeración latente.

Existe un factor llamado factor de calor sensible FCS, que relaciona la ganancia de calor sensible y la de calor latente:

$$FCS = \frac{Q_s}{Q_s + Q_l} = \frac{Q_s}{Q_T}$$

La ecuación para determinar la cantidad de aire necesario es la siguiente:

$$\dot{m} = \frac{Q_T}{(h_{int} - h_{my})}$$

6.3.1. Aire de retorno o proceso de mezclado

El proceso de mezclado de aire es aquél en el cual dos corrientes de aire se mezclan para formar una tercera corriente. El aire de retorno no tiene efecto sobre las condiciones interiores del espacio por condicionar.

De acuerdo al principio de la conservación de la energía, para la mezcla de dos flujos de aire es:

$$\dot{m}_1 \times h_1 + \dot{m}_2 \times h_2 = \dot{m}_3 \times h_3$$

En nuestro caso con una circulación de 15 % de aire exterior se determina la h_{mezcla} , con la siguiente ecuación.

$$0.15 \times h_{ext} + 0.85 \times h_{int} = h_{mezcla}$$

6.4. Carga máxima del equipo

Con la siguiente ecuación se determina la carga máxima del equipo:

⁵ De *Air Conditioning and Refrigeration*, 4ª edición, por Burgess H. Jennings y Samuel R. Lewis.

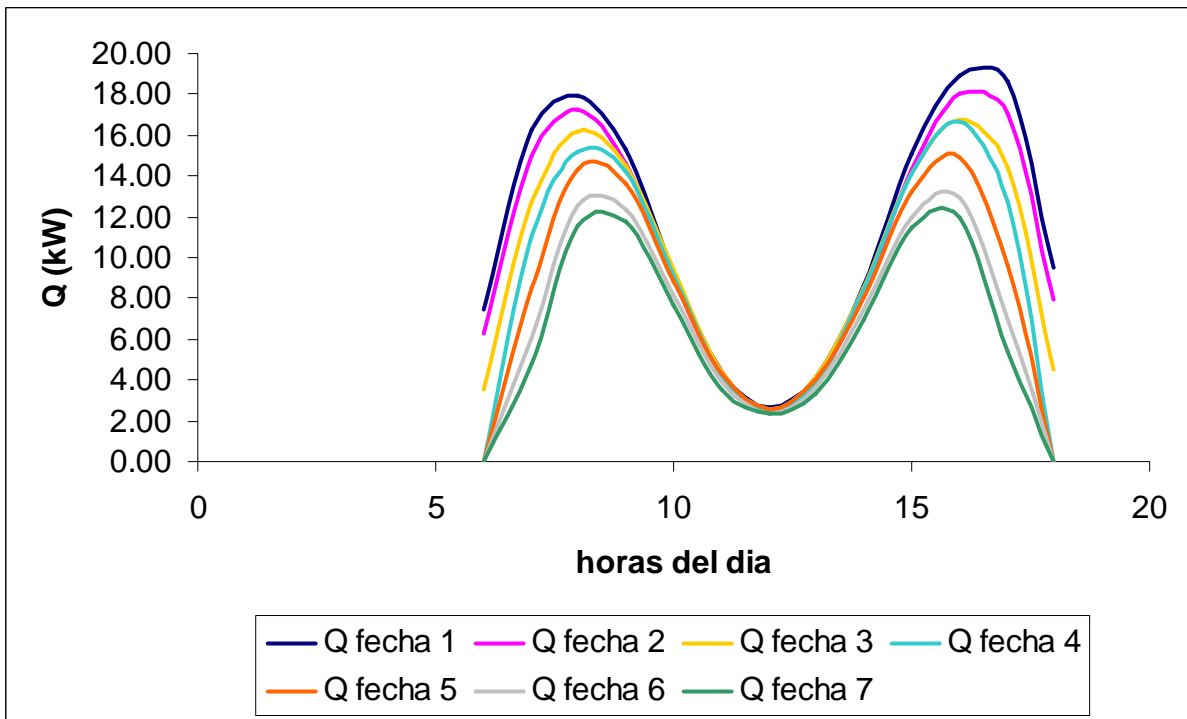
$$\dot{q}_{eq} = \dot{m}(h_{mezcla} - h_{iny})$$

6.5. Condiciones de diseño

Latitud norte (°)	19°19'
Temperatura exterior (BS) (°C)	30
Temperatura exterior (BH) (°C)	17
Temperatura interior (BS) (°C)	23
Humedad relativa interior (%)	50

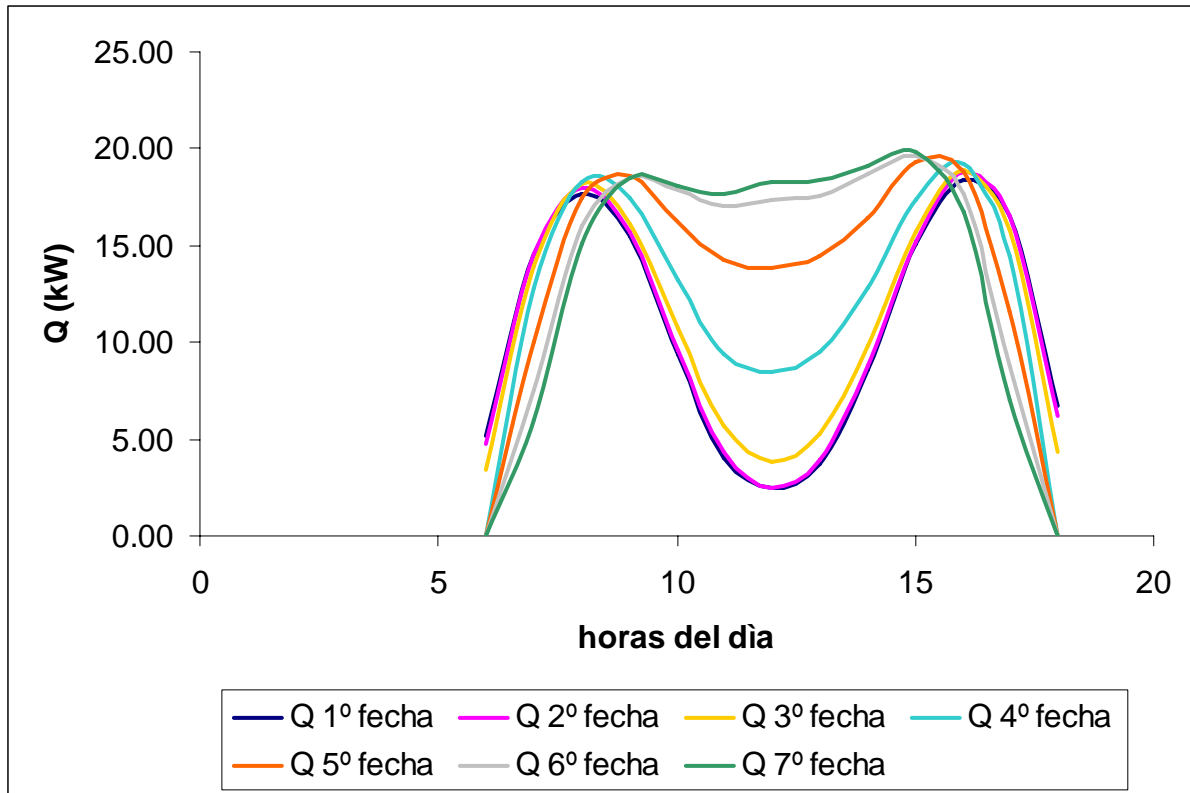
6.6. Resultados

6.6.1 Carga variable



Gráfica 6.1 Radiación a través de vidrios durante todo el año (7 fechas) vs. Horas del día. Sala Norte (audiovisuales).

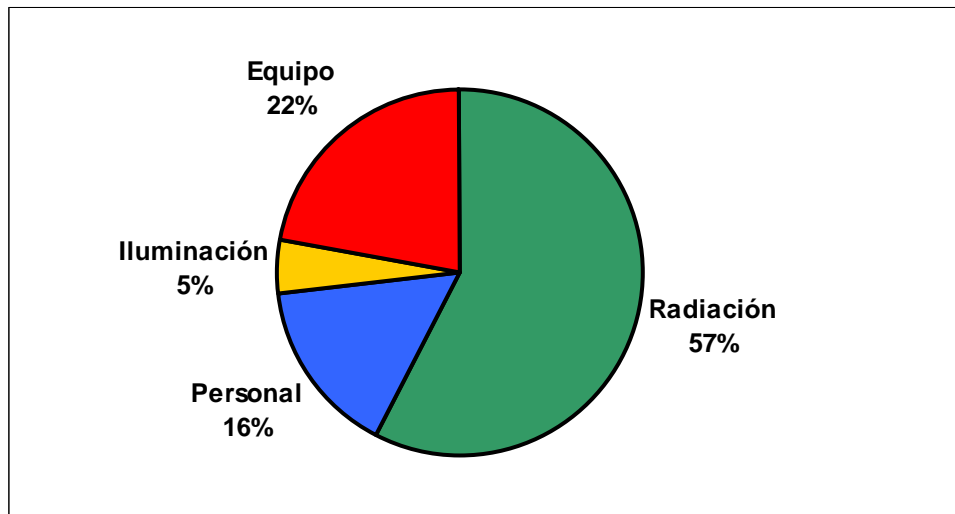
Se observa que la fecha de mayor radiación solar es 1^o fecha (21 de junio) a las 16 horas del día. Lo que quiere decir, que para la sala norte; este día de verano es donde se presentará mayor carga por transmisión en vidrios y muros.



Gráfica 6.2 Radiación a través de vidrios durante todo el año (7 fechas) vs. Horas del día. Sala Sur (eventos).

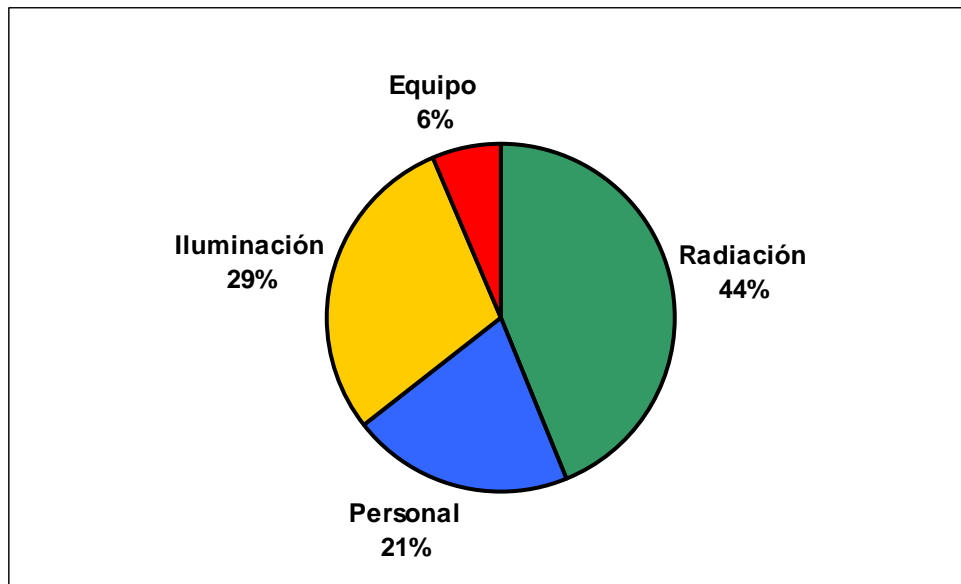
Se observa que la fecha de mayor radiación solar es 7^o fecha (22 de diciembre) a las 15 horas del día. Lo que quiere decir, que para la sala sur; este día de verano es donde se presentará mayor carga por transmisión en vidrios y muros.

6.6.2 Porcentajes de las diferentes ganancias de calor



Gráfica 6.3 Porcentajes de ganancias de calor Sala Norte (audiovisuales).

Se observa que la mayoría de la carga de enfriamiento es por radiación a través de vidrios, muros y techos (57%), un 22% el equipo, un 16% las personas y un 5% la iluminación de la sala.



Gráfica 6.4 Porcentajes de ganancias de calor Sala Sur (eventos).

Se observa que la mayoría de la carga de enfriamiento es por radiación a través de vidrios, muros y techos 44%, un 6% el equipo, un 21% las personas y un 29% la iluminación de la sala. En esta sala la iluminación representa una carga considerable, ya que se presenta mucha iluminación incandescente lo que aporta gran cantidad de calor.

6.7. Resultados de la ganancia de calor de las dos salas

Tabla 6.1

Ganancia térmica, Sala Norte y Sur.

Carga variable Máxima	Carga Sala Norte audiovisuales (kW)	Carga Sala Sur eventos (kW)
Vidrios, muros y techos	19	20
Carga constante		
Alumbrado	2	9
Personas	5	13
Equipo	8	3
Total	34	46
FCS	0.93	0.87
Flujo de aire m(kg/s)	2.26	2.77
Carga del equipo (kW)	35	47
<i>Carga del equipo en toneladas de refrigeración (ton)</i>	<i>10</i>	<i>13</i>

7. Análisis Económico

Los sistemas de refrigeración solar se caracterizan por su alto costo de inversión y bajo costo de operación. El problema económico básico es saber el costo comparado con el ahorro de energía.

Varios criterios económicos son propuestos para la evaluación y optimización de sistemas de energía solar. Para nuestro estudio utilizaremos, el siguiente criterio:

A) Periodo de reembolso.

La ecuación que nos determina el periodo de reembolso es la siguiente:

$$PB = \frac{\log \left[\frac{C}{E} \frac{i}{100} + 1 \right]}{\log \left(1 + \frac{i}{100} \right)}$$

Donde:

PB = periodo de reembolso. (Años)

C = costo inicial (equipo, materiales, mano de obra) (\$).

i = inflación de la energía.

E = ahorro de energía (\$/año).

Para determinar el ahorro de energía se determina con la siguiente ecuación.

$$E = (AAkWh \times PEkWh) - CAO$$

E = ahorro neto anual.² (\$/año)

AAkWh = Ahorro anual de kWh (\$/año)

PEkWh = precio estimado por kWh. (CFE) (\$/año).

CAO = costo anual de operación (\$/año).

Suponiendo un sistema convencional de aire acondicionado de aprox. 25 toneladas de refrigeración, con una temperatura de acondicionamiento de 25°C. Se gasta una potencia eléctrica de 23(kW) aproximadamente.

7.1 Condiciones económicas para un sistema desecante

Costo anual de operación (CAO): de un sistema convencional 4%³

Tiempo de vida: 15 años

¹ Tsoutsos T, Anagnostou J, Pritchard C, Karagiorgas M, Agoris D, "Solar cooling technologies in Greece. An economic viability análisis". Elsevier. ScienceDirect. March 2003.

² El ahorro de energía es estimado como si se tuviera un sistema convencional de compresión de vapor.

³ H.M. Henning, T. Erpenbeck, Integration of solar assisted open cooling cycles into building climatization systems, in: Proceedings of Eurosun 96, Freiburg, 1996.

Costo de instalación: 12% del costo del equipo desecante.⁴

Costo del equipo (C):= \$168,000 pesos. (Instalación y equipo).

Cambio de moneda (Noviembre 2006)= \$1 dólar = \$11 pesos.

Precio de la Energía (PEkWh): \$0.7841/kWh.⁵

Inflación de la energía. $i = 3.38\%$

Para determinar los parámetros AAKW se hacen dos consideraciones extremas: a) utilizando el equipo de las salas 8 horas a la semana, b) 8 horas diarias.

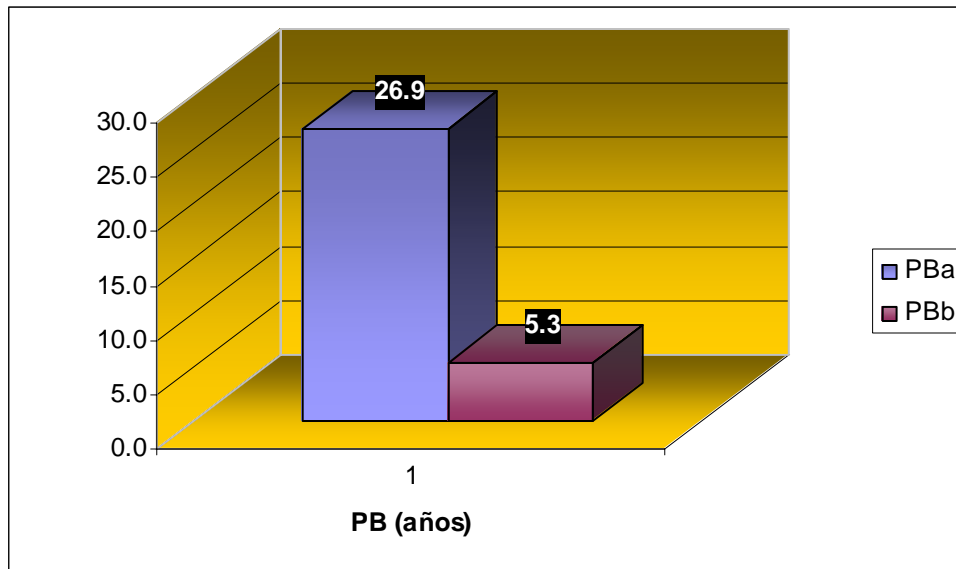
Para a) $AAkW_a = 8,832 \text{ kWh/año}$

$E_a = \$3,925.17/\text{año}$

b) $AAkW_b = 41,216 \text{ kWh/año}$

$E_b = \$29,317.46./\text{año}$

7.2 Resultados



Gráfica 6.5. Período de reembolso de un sistema desecante.

Se observa en la gráfica anterior que el periodo de reembolso de la opción *a* (PBa) es de 26.9 años, por lo que el proyecto de inversión no es rentable, ya que la vida del equipo es de 15 años; en cuanto la opción *b* (PBb) se observa que el periodo de reembolso es de 5.3 años, lo cual hace atractivo el proyecto, ya que se recupera en un tiempo menor que la vida media útil del equipo.

⁴ M.S. Peters, K.D. Timmerhaus, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, McGraw-Hill International Editions, 1994.

⁵ CFE, tarifa HM, zona centro, periodo intermedio.

8. Recomendaciones

La empresa Greenheck, pone a la venta un ventilador recuperador de energía modelo minivent-750 para aplicaciones comerciales e institucionales, que requieren ventilación de aire hasta de 800 pies cúbicos por minuto (pcm). Figura 6.1

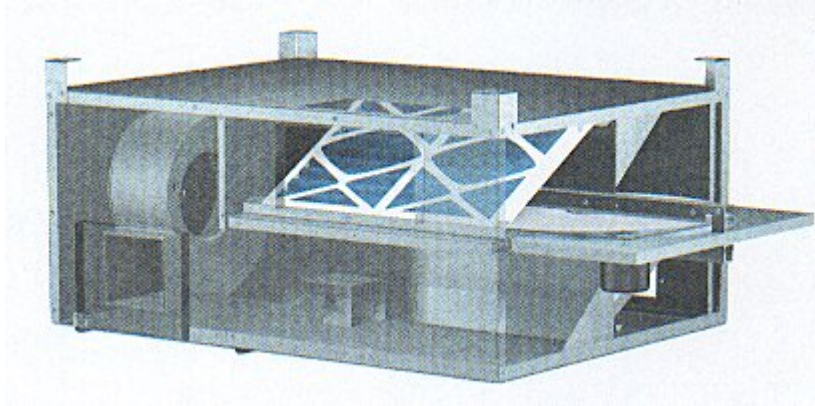


Figura 6.1 *Minivent 750 pcm.*

El aire es absorbido a través de una unidad de extracción por gravedad para instalación en el techo y pre-condicionado por la rueda. Entonces el aire exterior es proveído ya sea por aire manejado o directamente del espacio. La energía del aire de la habitación es recuperada antes de que sea extraído. Figura 6.2

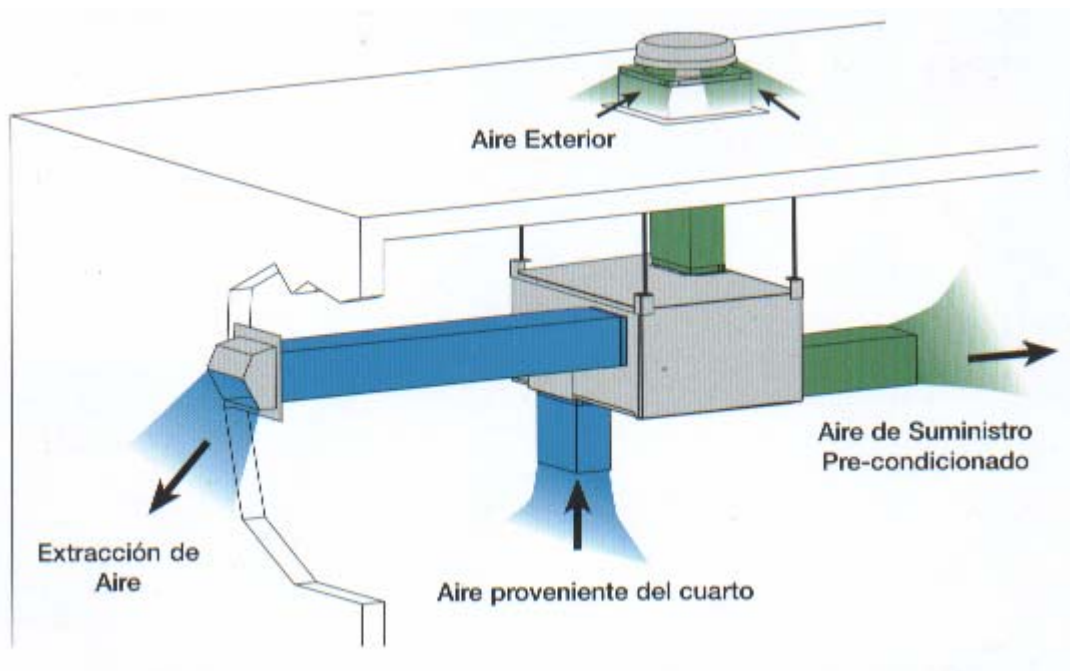


Figura 6.2. *Instalación típica del minivent*

El minivent presenta diferentes accesorios de suministro y extracción (Figura 6.3.) así como las diferentes configuraciones de suministro y descarga por si se presentan problemas de instalación. (Figura 6.4).

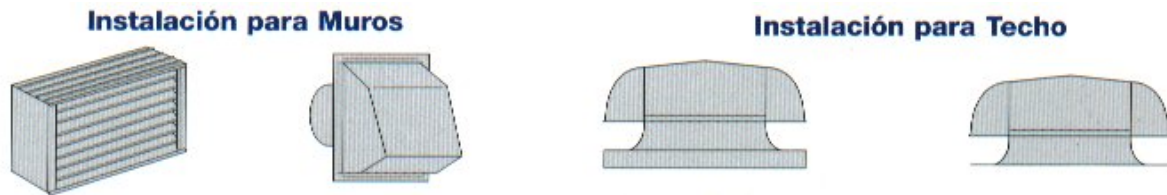


Figura 6.3 Accesorios de suministro y extracción.

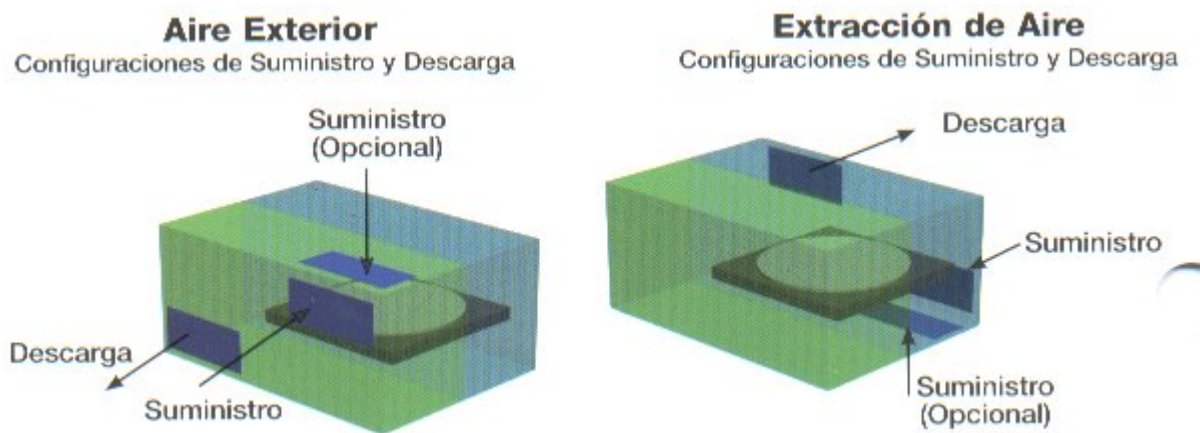


Figura 6.4 Configuraciones de suministro y descarga.

Si se eligiera el modelo minivent 750pcm. Y de acuerdo a la cantidad de aire necesario para ambas salas, para la sala norte se necesitarían: *7 ventiladores* y para la sala norte y *8 ventiladores para la sala sur*.

En cuanto a la elección de tipo de instalación, y configuraciones de suministro e instalación; sería conveniente elegir, el que utilice menor cantidad de material y sea más sencillo en operación y mantenimiento.

El problema básico es ensamblar, la corriente cálida que entra al dispositivo calefactor, elevando su temperatura y disminuyendo su humedad relativa, y el agua caliente almacenada en los tanques de la planta solar para proveer la energía para este calefactor.

9. Alternativas

El acondicionamiento de aire a partir de la energía solar (sistemas térmicos), presenta métodos muy diversos. De los cuales varias alternativas serían.

9.1 Refrigeración por adsorción (ciclo cerrado)

En este ciclo el refrigerante en forma de vapor no es comprimido a una alta presión y alta temperatura; es absorbido por un sólido con muy alta porosidad. Este proceso solo requiere de energía térmica, ninguna mecánica. El principio del proceso de adsorción proporciona dos procesos principales, adsorción o refrigeración y la desorción o regeneración. Figura 9.1.

Para el proceso discontinuo, el de regeneración, puede operar durante el día con energía del sol, y el de refrigeración opera durante la noche. La energía solar puede ser integrada con un generador. Un simple absorbente es requerido para un ciclo básico. Al aumentar el número de adsorbentes incrementamos la eficiencia, que depende del ciclo. Este proceso se puede adaptar a un proceso continuo.

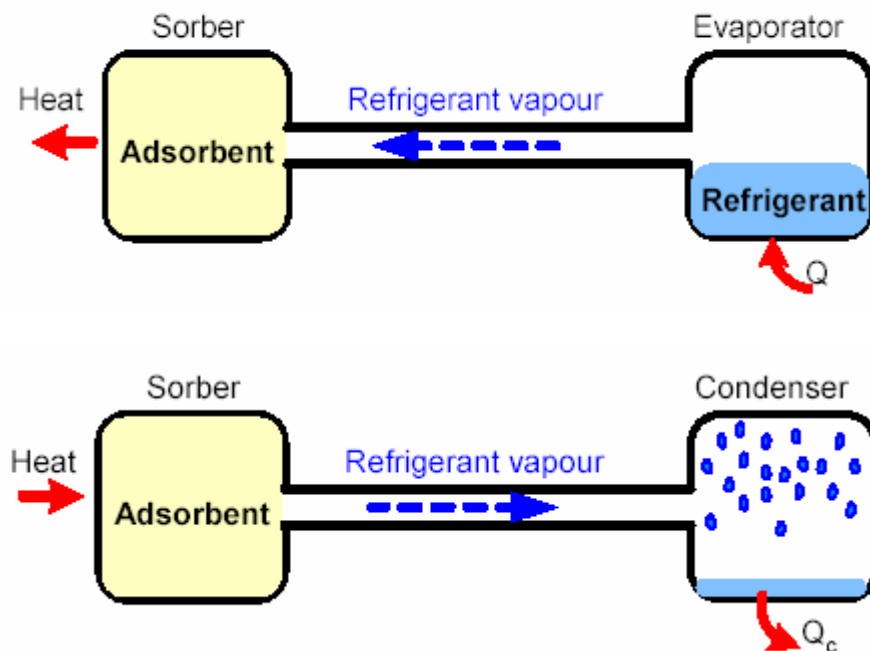


Figura 9.1 Procesos de adsorción (Refrigeración) y desorción (Regeneración).

Los sistemas de refrigeración por adsorción que trabajan en ciclo cerrado, también utilizando sorbentes sólidos. Por ejemplo la tecnología de sílica gel –agua. Figura 9.2.

9.2 Refrigeración por absorción con sorbentes líquidos (ciclo cerrado)

Otra tecnología son las máquinas de refrigeración en ciclo cerrado con desecantes líquidos, las cuales se existen tres tecnologías de absorción en el mercado.

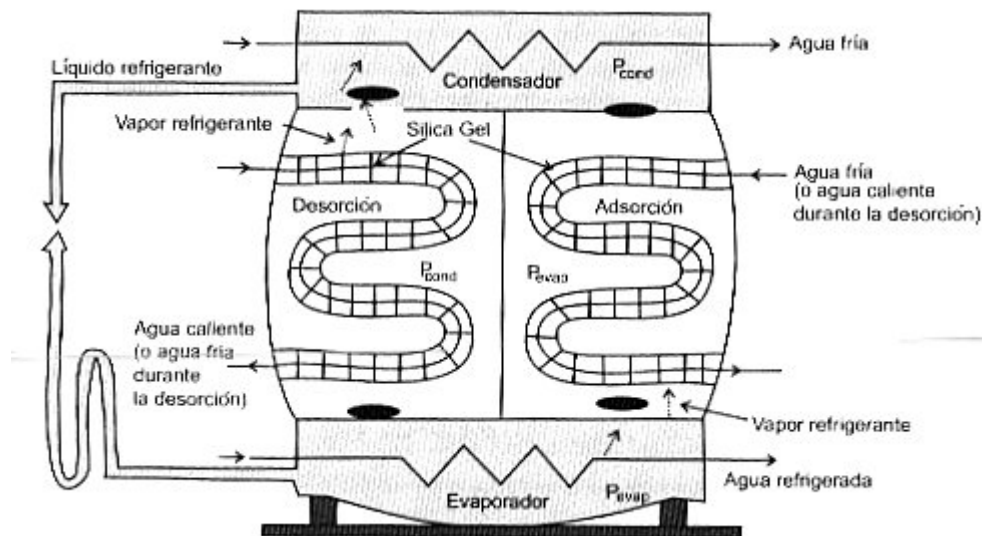


Figura 9.2 Esquema de una máquina de adsorción comercial.

A) Máquinas de amoníaco-agua

El par amoníaco-agua ha sido utilizado en máquinas de absorción desde finales del siglo XIX. El amoníaco actúa como refrigerante lo que permite bajar a temperaturas mucho mayores de refrigeración (el punto de congelamiento del amoníaco es -77°C). La toxicidad del amoníaco ha sido un factor que ha limitado el uso de estos sistemas a lugares bien ventilados. La posibilidad de utilizar directamente quemadores de gas para proveer aire refrigerado para sistemas de aire acondicionado es uno de los factores que más mercado abre estos productos. Se encuentran máquinas en el mercado con potencias entre 10 y 90 kW pero con coeficientes de operación de 0.5.

B) Máquinas de amoníaco-agua hidrógeno. (Ciclo de Platen-Munters)

Esta tecnología es descendiente de las patentadas por los suecos von Platen y Munters en 1921. Desde aquellos primeros modelos siempre se han encontrado en el mercado refrigeradores domésticos basados en esta tecnología.

Este sistema no necesita partes móviles ni energía auxiliar de suministro al sistema. El hidrógeno es utilizado para mantener la presión constante total en el sistema. La presión parcial del refrigerante puede estar por debajo de la presión del evaporador, realizando el efecto refrigerante. El amoníaco es convencionalmente utilizado como refrigerante, agua como medio absorbente e hidrógeno como gas inerte.

C) Máquinas de agua-bromuro de litio

El agua-bromuro de litio es un par de absorción que ha sido ampliamente utilizado desde 1950. El agua actúa como refrigerante y por ello la refrigeración se limita a temperaturas sobre 0° C. Estas máquinas se suelen utilizar para enfriar agua destinada a sistemas de aire acondicionado en grandes edificios dando valores del COP entre 0.7 y 1.2. Las potencias comerciales varían entre 35 y 5000 kW.

La tecnología *agua-bromuro de litio* es la mas adecuada para el funcionamiento con energía solar, por requerir temperaturas de regenerador menos alta; que en nuestro caso, observando las temperaturas de los tanques, se tienen temperaturas relativamente bajas.

Las máquinas de absorción se integran dentro del mismo grupo de producción de frío que las convencionales de compresión, ya que la refrigeración se consigue mediante la evaporación de un líquido a baja presión, a diferencia de los máquinas de compresión, las funciones del compresor son realizadas por diferentes dispositivos: absorbedor, regenerador y bomba (figura 7.2).

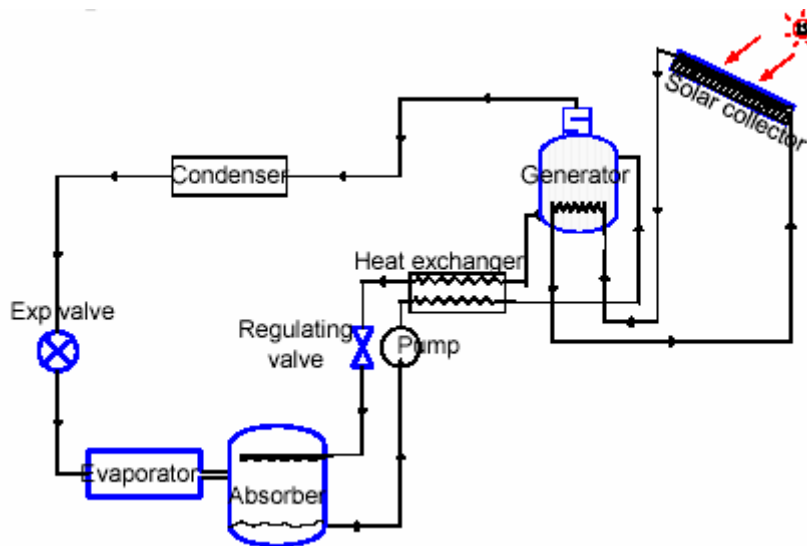


Figura 9.3. Sistema de refrigeración por absorción.

Los componentes principales del sistema son un absorbedor, un generador, un condensador, una válvula de expansión, un intercambiador de calor y una bomba. Dos tipos de procesos son usados al mismo tiempo uno de refrigeración y uno de absorción. El refrigerante en forma de vapor fluye a través del condensador pasando por una trampa de vapor y se condensa. El refrigerante líquido del condensador va hacia la válvula de expansión donde la presión decrece para poder entrar a la misma presión del evaporador. En el evaporador, se alcanza el efecto refrigerante por la vaporización del refrigerante a baja temperatura. El refrigerante en forma de vapor continua al absorbedor se disuelve en una solución débil de refrigerante, obteniendo una solución fuerte de refrigerante, llamada solución rica. Una bomba es la única parte móvil en este sistema, la solución rica será bombeada al generador, donde la solución se evapora; el refrigerante es separado de la solución. El refrigerante es vaporizado y

va al condensador mientras que la solución débil es pasada por un intercambiador de calor y regresada al absorbedor, para absorber refrigerante en forma de vapor.

9.3 Paneles fotovoltaicos

Hay dos tipos de sistemas que utilizan Paneles fotovoltaicos para refrigeración.

9.3.1 Ciclo de refrigeración solar por compresión de vapor

Este sistema utiliza electricidad de los paneles fotovoltaicos. Este sistema es absolutamente caro debido a los altos costos de la instalación y la baja eficiencia de los paneles fotovoltaicos; además este es efectivo en un área de la red de electricidad donde la capacidad de refrigeración es baja. Este es ampliamente utilizado para almacenamiento de vacunas en áreas remotas.

En contraste, aplicaciones de refrigeración y congelación son necesarias para almacenamiento de material perecedero, por ejemplo comida y vacunas. Los sistemas de PV son muy efectivos, pero el costo de instalación es muy alto. Además, requiere de avanzados conocimientos técnicos para correr éstos sistemas. Figura 9.4 .

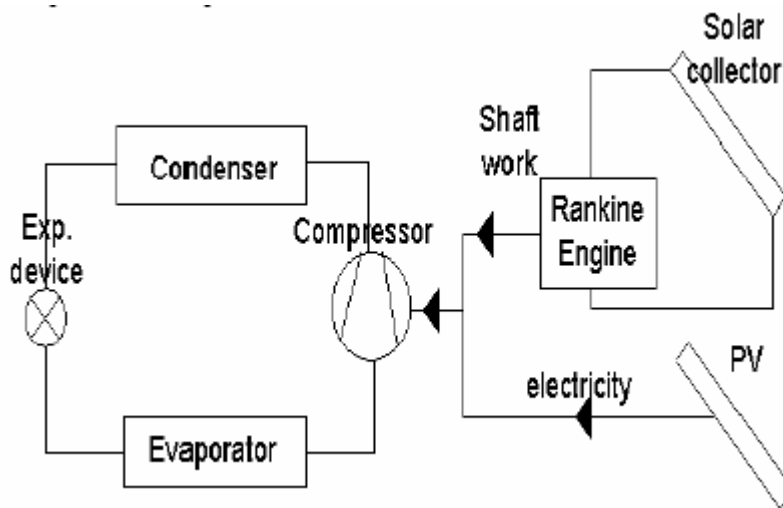


Figura 9.4 Sistema solar por compresión de vapor.

9.3.2 Ciclo de refrigeración termoelectrico (Peltier)

Este ciclo es conveniente para pequeñas aplicaciones. La refrigeración se alcanza manejando una corriente eléctrica en un circuito contenido en la unión de diferentes metales. El fenómeno es llamado efecto reverse-Seebeck. Este no necesita partes móviles ni fluidos de trabajo. Este sistema es pequeño y conveniente utilizarlo en un refrigerador móvil. Figura 9.5.

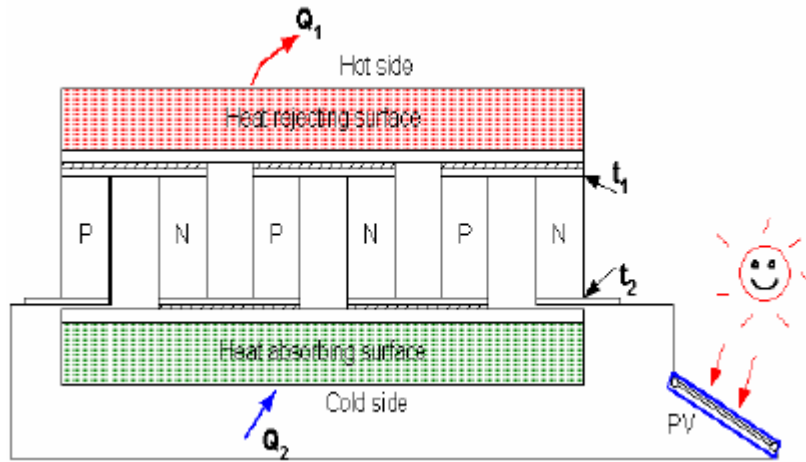


Figura 9.5 Sistema solar de refrigeración termoeléctrico.

10. Conclusiones

Después de conocer algunas de las aplicaciones de acondicionamiento de aire utilizando colectores solares de placa plana, y analizando la cantidad de energía térmica almacenada en los tanques; la solución planteada ataca de lleno el problema de confort térmico en épocas de verano, donde la temperatura se nos eleva de manera considerable. Esta es un de tantas aplicaciones que se le pueden dar a la planta solar instalada en la torre de Ingeniería.

Aparte del uso práctico que se le puede dar a la planta solar, contiene un enfoque tecnológico, lo que para México es algo novedoso, para muchos países industrializados representa una tecnología que pronto va a dejar de ser novedosa, ya que nuestros recursos energéticos en todo el mundo se agotan, por lo que la energía solar se va a convertir en necesaria como recurso energético para los seres humanos.

También es importante señalar que los sistemas de refrigeración solar, debido a su tecnología, presentan un alto costo de inversión, así como de instalación, lo que para muchos países en vías de desarrollo representa un obstáculo para la utilización de estos en confort, ya que se ve como un lujo, debido en gran medida a las diferencias sociales y económicas; por lo que entre más urbana, rica energéticamente sea una sociedad tendrá mayores expectativas en utilizar estos sistemas en confort. Pero no por ello se descarta la posibilidad de utilizar estos sistemas en confort. Debido a que en gran parte del territorio nacional se utilizan sistemas de aire acondicionado convencionales, lo que consumen una cantidad considerable de energía eléctrica.

Nosotros como ingenieros estamos concientes del ahorro de energía que representa utilizar estos sistemas, nos corresponderá diseñar el mejor sistema de refrigeración solar, dependiendo de la aplicación requerida, para utilizarlo de forma que represente mayor ahorro energético, trayendo como consecuencia mayor ahorro económico, y que utilizando energía solar, la cual no se agotará en largo tiempo.

11. Fuentes consultadas

11.1 Artículos digitales

- Wimolsiri Pridasaw, Teclemariam Nemariam, “Solar Cooling”, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, June 27, 2003. Assignment for Ph.D. Course: Solar Heating, Technical University of Denmark (DTU).
- Hans-Martin Henning, “Solar assisted air conditioning of buildings – an overview”, Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany; accepted 27 July 2006.Elsevier. ScienceDirect.
- Gota, Rupert “Diseño, simulación y optimización del sistema de ventilación natural de la Torre de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM. México DF.

11.2 Libros

- Pita, Edward. “Acondicionamiento de Aire Principios y Sistemas”, segunda edición ed. Continental, México 1997.
- Ibáñez Plana M. Rosell Polo, J.R., Rosell Urrutia, J.I. “Energías Renovables Tecnología solar”, ediciones Mundi-Prensa, México 2004.

11.3 Programas utilizados

- “Simulador de un destilador solar de multietapas” basado en CSADI ver. PC BASIC 08/89. J L Fernández Zayas, instituto de Ingeniería, UNAM, México.

12 Apéndice

12.1. Cálculo de carga de enfriamiento de forma específica (sala norte y sur)

Especificaciones de Estructura, iluminación, personas y equipo.

Sala norte

Estructura

Estructura	Orientación	Características físicas	A (m²)	Observaciones
Vidrio	Norte	Espesor 6mm Sencillo claro	69.12	Cuenta con laminilla de plástico oscuro por la parte interior
Vidrio	Este	Espesor 6mm Sencillo claro	0	Cuenta con laminilla de plástico oscuro por la parte interior, y por la parte exterior cuenta con malla enrollable opaca de polímero. CS = 0.31 con malla, sin malla CS = 0.69
Vidrio	Sur	Espesor 6mm Sencillo claro	51.84	Solo una puerta, pero no le llega radiación solar
Vidrio	Oeste	Espesor 6mm Sencillo claro	51.84	Cuenta con laminilla de plástico oscuro por la parte interior, y por la parte exterior cuenta con malla enrollable opaca de polímero. CS = 0.31 con malla, sin malla CS = 0.69
Muro	Norte	concreto de 8 in + espacio de aire + aislamiento de fibra de vidrio y lámina (gris claro)	0	U = 0.489 (kcal/h m ² °C). No presenta ningún muro la sala en esta orientación.
Muro	Este	bis	26.35	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Muro	Sur	bis	43.40	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Muro	Oeste	bis	26.35	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Techo	---	concreto hueco de 52 in; 4 in espesor + aislamiento de aire	268.27	U = 0.020 (kcal/h m ² °C).

Iluminación

Lugar	Descripción	Potencia total (W)	Q (kW)
Salas de audio	12 sistemas de 2*32W T8, y un reflector HID 20W	384, 20	0.48, 0.02
Baños	12 lámparas incandescentes reflectoras 75W	900	0.9
Cocina	4 lámparas fluorescentes compactas 26W, y foco de campana 40W	104,40	0.13, 0.04
		TOTAL (kW)	2

Personas

Se considero una máximo de 40 personas con un grado de actividad ligero (trabajo de oficina), donde según la tabla correspondiente son $q = 450$ (Btu/hr).

Número de personas	Descripción	Q = 450 (Btu/hr)	=0.13(kW)
40	Trabajo de oficina	TOTAL (kW)	5

Equipo

Equipo	W (W)	Q (Btu/h)
Impresora	762	2600.706
Televisor	75	255.975
Parrilla eléctrica	5800	19795.4
Cañón audiovisual	780	2662.14
Frigobar	108	368.604
		25682.825
	Total Total (kW)	8

Sala Sur*Estructura*

Estructura	Orientación	Características físicas	A (m²)	Observaciones
Vidrio	Norte	Espesor 6mm Sencillo claro	0	No se cuenta con vidrio alguno
Vidrio	Este	Espesor 6mm Sencillo claro	44.79	Por la parte exterior cuenta con malla enrollable opaca de polímero. CS = 0.45 con malla, sin malla CS = 0.94
Vidrio	Sur	Espesor 6mm Sencillo claro	47.37	Toda la pared es de vidrio.
Vidrio	Oeste	Espesor 6mm Sencillo claro	44.79	Por la parte exterior cuenta con malla enrollable opaca de polímero. CS = 0.45 con malla, sin malla CS = 0.
Muro	Norte	concreto de 8 in + espacio de aire + aislamiento de fibra de vidrio y lámina (gris claro)	0	U = 0.489 (kcal/h m ² °C). No hay ganancia térmica debido a que cuenta con techo prolongado y una laminas verticales que no dejan entrar rayo de sol alguno.
Muro	Este	bis	13.88	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Muro	Sur	bis	0	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Muro	Oeste	bis	13.88	U = 0.489 (kcal/h m ² °C).
Techo	---	concreto hueco de 52 in; 4 in espesor + aislamiento de aire	256.31	U = 0.020 (kcal/h m ² °C).

Iluminación.

Lugar	Descripción	Potencia total (W)	Q (kW)
Salas de eventos	180 lámparas dicroicas compactas de 50W	9000	9
Cocina	10 lámparas fluorescentes circulares de 32W	320	0.4
		TOTAL (kW)	9

Personas

Se considero una máximo de 100 personas con un grado de actividad ligero (trabajo de oficina), donde según la tabla correspondiente son $q = 450$ (Btu/hr).

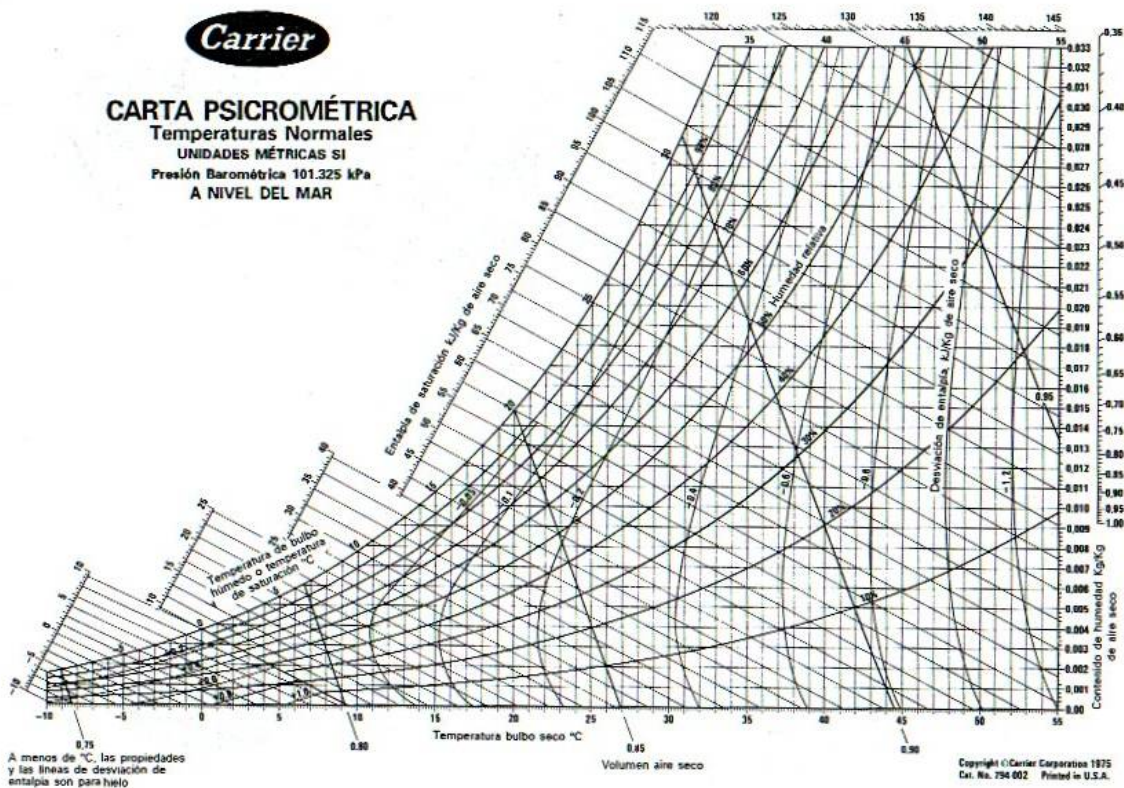
Número de personas	Descripción	Q = 450 (Btu/hr)	=0.13(kW)
100	Trabajo de oficina	TOTAL (kW)	13

Equipo

	W (W)	Q (Btu/h)
Refrigerador 1	460	1569.98
Refrigerador 2	500	1706.5
Estufa eléctrica	2000	6826
	total	10,103
	Total (kW)	3

12.2 Tablas utilizadas

- Carta psicrométrica



- Factor de ganancia solar (FGS)

20° Latitud Norte		Hora Solar												
Época	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 Junio	N	76	111	90	68	51	46	40	46	51	67	90	111	75
	NE	219	417	390	330	225	103	40	38	38	38	32	24	8
	E	219	401	434	387	260	111	38	38	38	38	32	24	8
	SE	75	168	198	179	119	57	38	38	38	38	32	24	8
	S	8	24	32	38	38	38	38	38	38	38	32	24	8
	SO	8	24	32	38	38	38	38	57	119	179	198	188	75
	O	8	24	32	38	38	38	38	111	260	387	434	401	220
	NO	8	24	32	38	38	38	40	103	225	330	390	417	220
	Horizontal	30	162	328	477	585	629	678	628	585	477	328	162	30
22 Julio y 21 Mayo	N	54	75	62	46	40	38	38	35	40	46	62	75	54
	NE	192	358	374	301	198	84	38	38	38	35	32	21	8
	E	203	401	442	393	268	124	38	38	38	35	32	21	8
	SE	84	189	230	214	154	78	38	38	38	35	32	21	8
	S	8	21	32	35	38	38	38	38	38	35	32	21	8
	SO	8	21	32	35	38	38	38	78	154	214	230	189	84
	O	8	21	32	35	38	38	38	124	268	393	442	401	203
	NO	8	21	32	35	38	38	38	84	198	301	374	358	192
	Horizontal	8	149	320	474	585	650	680	650	585	474	320	149	8
24 Agosto y 28 Abril	N	16	27	29	35	38	38	38	38	38	35	29	27	16
	NE	122	301	320	241	135	48	38	38	38	35	29	19	5
	E	143	385	447	404	287	138	38	38	38	35	29	19	5
	SE	78	241	306	292	265	149	54	38	38	35	29	19	5
	S	5	19	29	38	54	65	70	65	54	38	29	19	5
	SO	5	19	29	35	38	38	54	149	265	292	306	241	78
	O	5	19	29	35	38	38	38	138	237	404	447	395	143
	NO	5	19	29	35	38	38	38	48	135	241	320	301	122
	Horizontal	13	130	290	452	569	637	659	637	569	452	290	130	13
22 Septiembre y 22 Marzo	N	0	10	8	29	35	38	38	38	38	35	29	16	0
	NE	0	225	235	160	59	38	38	38	38	35	29	16	0
	E	0	352	442	404	282	122	38	38	38	35	29	16	0
	SE	0	268	368	379	325	227	111	40	38	35	29	16	0
	S	0	21	59	103	141	170	176	172	141	103	59	21	0
	SO	0	16	29	35	38	40	111	227	325	379	368	268	0
	O	0	16	29	35	38	38	38	122	282	404	442	352	0
	NO	0	16	29	35	38	38	38	59	160	235	225	16	0
	Horizontal	0	81	252	414	537	610	631	610	537	414	252	81	0
22 Octubre y 20 Febrero	N	0	10	24	32	35	38	38	38	35	32	24	10	0
	NE	0	119	141	78	35	38	38	38	35	32	24	10	0
	E	0	268	398	382	271	132	38	38	35	32	24	10	0
	SE	0	246	396	433	404	322	200	79	35	32	24	10	0
	S	0	57	135	206	252	287	301	287	252	206	135	57	0
	SO	0	10	24	32	35	73	200	322	404	433	396	246	0
	O	0	10	24	32	35	38	38	132	271	382	398	268	0
	NO	0	10	24	32	35	38	38	35	78	141	119	10	0
	Horizontal	0	48	184	344	463	531	564	531	463	344	184	48	0
21 Noviembre y 21 Enero	N	0	8	21	29	35	35	35	35	35	29	21	8	0
	NE	0	65	70	36	35	35	35	35	35	29	21	8	0
	E	0	192	347	344	246	116	35	35	35	29	21	8	0
	SE	0	198	390	444	428	366	246	124	43	29	21	8	0
	S	0	75	187	271	333	368	382	368	333	271	187	75	0
	SO	0	8	21	29	43	124	246	366	428	444	390	198	0
	O	0	8	21	29	32	35	35	116	246	344	347	192	0
	NO	0	8	21	29	32	35	35	35	35	38	70	65	0
	Horizontal	0	13	130	273	396	466	488	466	396	278	130	13	0
22 Diciembre	N	0	5	19	29	32	35	35	35	32	29	19	5	0
	NE	0	38	48	32	32	35	35	35	32	29	19	5	0
	E	0	151	320	328	230	92	35	35	32	29	19	5	0
	SE	0	160	377	452	431	363	263	162	54	29	19	5	0
	S	0	67	200	301	358	396	404	396	358	301	200	67	0
	SO	0	5	19	29	54	162	263	363	431	452	377	160	0
	O	0	5	19	29	32	35	35	92	230	328	320	151	0
	NO	0	5	19	29	32	35	35	35	32	32	48	38	0
	Horizontal	0	10	97	249	360	436	461	436	366	249	97	10	0

- Factor de carga de enfriamiento (FCE)

Latitud norte. Ventana Construc- ción del hacia el recinto	Hora solar, h																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	L	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.65	0.74	0.81	0.87	0.91	0.91	0.88	0.84	0.77	0.80	0.92	0.27	0.19	0.15	0.12	0.10	0.08
	M	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07	0.73	0.66	0.65	0.73	0.80	0.86	0.89	0.86	0.82	0.75	0.78	0.91	0.24	0.18	0.15	0.13	0.11	0.09
	H	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	0.75	0.67	0.66	0.74	0.80	0.86	0.89	0.88	0.85	0.80	0.73	0.88	0.23	0.17	0.14	0.13	0.11	0.10
NE	L	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.55	0.76	0.75	0.60	0.39	0.31	0.28	0.27	0.25	0.23	0.20	0.16	0.12	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02
	M	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.56	0.76	0.74	0.58	0.37	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22	0.20	0.16	0.12	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
	H	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.57	0.77	0.74	0.58	0.36	0.28	0.26	0.25	0.23	0.21	0.19	0.16	0.11	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
E	L	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.45	0.71	0.80	0.77	0.64	0.43	0.29	0.25	0.23	0.20	0.17	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02
	M	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.47	0.72	0.80	0.76	0.62	0.41	0.27	0.24	0.22	0.20	0.17	0.14	0.11	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
	H	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.48	0.72	0.80	0.75	0.61	0.40	0.25	0.22	0.21	0.19	0.16	0.14	0.10	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
SE	L	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.29	0.56	0.74	0.82	0.81	0.70	0.52	0.35	0.30	0.26	0.22	0.18	0.13	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
	M	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.30	0.56	0.74	0.81	0.79	0.68	0.49	0.33	0.28	0.25	0.22	0.18	0.13	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
	H	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.31	0.57	0.74	0.81	0.79	0.67	0.48	0.31	0.27	0.23	0.20	0.17	0.13	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05
S	L	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.08	0.15	0.22	0.37	0.58	0.75	0.84	0.82	0.71	0.53	0.37	0.29	0.20	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05
	M	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.09	0.16	0.22	0.38	0.58	0.75	0.83	0.80	0.68	0.50	0.35	0.27	0.19	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06
	H	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.11	0.17	0.24	0.39	0.59	0.75	0.82	0.79	0.67	0.49	0.33	0.26	0.18	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05
SW	L	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.06	0.10	0.13	0.16	0.18	0.22	0.38	0.59	0.76	0.84	0.83	0.72	0.48	0.18	0.13	0.11	0.08	0.07
	M	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.07	0.11	0.14	0.16	0.19	0.22	0.38	0.59	0.75	0.83	0.81	0.69	0.45	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07
	H	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.08	0.12	0.15	0.18	0.20	0.23	0.39	0.59	0.75	0.82	0.80	0.68	0.43	0.14	0.11	0.09	0.08	0.07
W	L	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.05	0.08	0.11	0.13	0.14	0.15	0.17	0.30	0.53	0.72	0.83	0.83	0.63	0.19	0.14	0.11	0.08	0.07
	M	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.06	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	0.31	0.53	0.72	0.82	0.81	0.61	0.16	0.12	0.10	0.08	0.07
	H	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.07	0.10	0.12	0.14	0.16	0.17	0.18	0.31	0.54	0.71	0.81	0.80	0.59	0.15	0.11	0.09	0.07	0.06
NW	L	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.06	0.10	0.13	0.16	0.19	0.20	0.21	0.22	0.30	0.52	0.73	0.83	0.71	0.19	0.13	0.10	0.08	0.07
	M	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.07	0.11	0.14	0.17	0.19	0.20	0.21	0.22	0.30	0.52	0.73	0.82	0.69	0.16	0.12	0.09	0.08	0.07
	H	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.12	0.15	0.18	0.20	0.21	0.22	0.23	0.30	0.52	0.73	0.81	0.67	0.15	0.11	0.08	0.07	0.06
HORA	L	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.10	0.26	0.43	0.59	0.72	0.81	0.87	0.87	0.83	0.74	0.60	0.44	0.27	0.15	0.12	0.09	0.08	0.06
	M	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.12	0.27	0.44	0.59	0.72	0.81	0.85	0.85	0.81	0.71	0.58	0.42	0.25	0.14	0.12	0.10	0.08	0.07
	H	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.13	0.29	0.45	0.60	0.72	0.81	0.85	0.84	0.79	0.70	0.56	0.40	0.23	0.13	0.11	0.09	0.08	0.07

L = Construcción ligera: Pared exterior de bastidores, losa de piso de concreto de 2 in, con aprox. 30 lb de material/ft² de piso.
M = Construcción media: Pared exterior de concreto de 4 in, losa de piso de concreto de 4 in, con aprox. 70 lb de material de construcción por ft² de piso.
H = Construcción pesada: Pared exterior de concreto de 6 in, losa de piso de concreto de 6 in, con aprox. 130 lb de material de construcción por ft² de piso.

- 1) Temperatura equivalente muros. (° C)

TABLA DE TEMPERATURA EQUIVALENTE PARA MUROS EN G. CENTIGRADOS

Lat. Norte	TIEMPO SOLAR												Lat. Sur
	A.M.				P.M.								
	3	10	12	2	4	6	8	10	12				

Parad hacia el:	COLOR EXTERIOR DE LA PARED (O = OSCURA, C = CLARA)												Parad hacia el:	
	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C

Partición

NE	12	6	13	7	8	6	7	8	8	8	8	6	6	3	2	1	1	SE
E	17	6	20	10	13	9	7	7	8	8	8	6	6	3	3	1	1	E
SE	7	3	14	9	16	10	13	9	9	8	8	6	6	3	2	1	1	NE
S	-2	-2	2	0	12	7	17	11	14	11	9	8	6	6	3	3	1	N
SO	-2	-2	0	-1	3	2	14	12	22	16	23	15	13	11	3	2	1	NO
O	-2	-2	0	0	3	3	11	7	22	16	27	19	12	12	4	4	1	O
NO	-2	-2	0	-1	2	2	7	6	13	11	23	14	10	13	3	2	1	SO
N	-2	-2	-1	-1	2	2	6	5	8	8	7	7	4	4	2	2	0	S

Tabique de 4 pig. o piedra.

NE	-1	-2	13	7	11	6	6	3	7	6	8	8	7	7	6	6	3	2	SE
E	1	0	17	8	17	9	8	8	7	7	8	8	7	7	6	4	3	3	E
SE	7	-1	14	6	15	8	14	9	10	6	8	6	7	7	6	4	3	3	NE
S	-2	-2	-1	-1	7	3	13	9	14	10	11	9	7	7	4	4	2	2	N
SO	0	-1	6	-1	1	1	7	4	18	12	20	14	19	13	6	4	3	3	NO
O	0	-1	0	0	2	1	6	4	14	10	22	16	23	16	9	8	3	3	O
NO	-2	-2	-1	-1	1	1	4	3	7	7	17	12	19	13	7	6	3	3	SO
N	-2	-2	-1	-1	0	0	3	3	6	6	7	7	7	7	4	4	2	2	S

Ladrillo hueco de 8 pig.

NE	0	0	0	0	11	6	9	6	6	3	7	6	6	7	7	6	4	4	SE
E	2	1	7	2	13	7	14	6	11	7	7	8	8	7	8	6	5	4	E
SE	1	0	1	0	9	4	11	7	11	6	6	7	8	7	7	6	4	3	NE
S	0	0	0	0	1	0	7	3	13	8	14	9	11	9	7	6	4	2	N
SO	1	0	1	0	1	0	3	2	7	6	14	10	17	11	14	10	4	3	NO
O	2	1	2	1	2	1	3	2	6	4	10	8	17	12	18	12	10	6	O
NO	0	0	0	0	1	0	2	1	4	3	7	5	12	10	17	12	6	4	SO
N	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	3	3	8	8	6	6	6	6	3	3	S

Tabique de 8 pig. - Ladrillo hueco de 12 pig.

NE	1	1	1	1	6	1	9	4	3	4	6	3	6	4	6	6	6	4	SE
E	4	3	4	3	8	4	10	6	10	6	8	6	6	6	6	6	7	6	E
SE	4	2	3	2	3	2	8	6	10	7	9	7	7	6	7	6	7	6	NE
S	2	1	2	1	2	1	2	1	6	3	9	6	9	7	7	6	6	4	N
SO	4	2	3	2	3	2	4	2	6	3	7	4	11	7	13	9	11	8	NO
O	4	2	3	2	3	2	4	3	6	3	8	4	11	6	13	9	13	6	O
NO	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	4	3	6	4	6	6	10	6	SO
N	3	2	3	2	3	2	0	0	1	1	3	3	4	4	4	4	3	3	S

- 2) Temperatura equivalente muros. (° C)

TABLA DE TEMPERATURA EQUIVALENTE PARA MUROS EN G. CENTIGRADOS

lat. Norte	TIEMPO SOLAR												lat. S						
	A.M.						P.M.												
Pared	3	10	12	2	4	6	8	9	10	12	COLOR EXTERIOR DE LA PARED (O = OSCURA, C = CLARA)						Pared		
Hacia el:	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	O	C	Hacia el:		
Tabique de 12 plg.																			
NE	4	3	4	3	4	3	4	2	2	2	7	3	7	3	6	3	6	4	SE
E	7	4	7	4	7	4	5	3	7	4	8	8	8	8	5	4	5	4	E
SE	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	7	4	8	4	8	6	7	4	NE
S	4	3	4	3	3	2	3	2	3	2	4	2	6	3	7	4	7	4	N
SO	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	4	6	4	7	4	6	5	NO
O	7	4	7	4	7	4	6	3	8	3	6	3	6	3	7	4	6	5	O
NO	4	3	4	3	4	2	4	2	6	2	4	2	6	3	6	3	6	3	SO
N	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	S

Concreto o piedra de 2 plg. o bien, bloque de concreto de 6 u 2 plg.

NE	2	1	2	0	9	4	8	4	6	3	7	4	7	6	6	4	4	3	SE
E	3	2	3	4	13	7	13	7	10	6	9	6	8	6	7	6	6	4	E
SE	3	1	3	2	9	6	10	7	10	7	8	7	7	6	7	6	6	4	NE
S	1	1	1	1	2	1	7	3	9	7	15	7	8	7	6	4	4	3	N
SO	3	1	2	1	3	1	4	2	8	6	12	9	13	9	12	9	6	4	NO
O	3	2	3	2	3	2	4	3	7	4	11	8	16	10	16	10	6	5	O
NO	2	1	2	0	2	1	2	2	3	3	7	6	11	8	13	9	4	3	SO
N	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2	S

Concreto o piedra de 12 plg.

NE	2	2	3	1	3	1	8	4	6	4	8	4	5	4	7	6	6	4	SE
E	6	3	4	3	8	3	10	6	10	7	9	6	7	5	8	6	6	5	E
SE	4	2	4	2	3	2	8	4	6	6	9	6	8	5	7	6	7	5	NE
S	3	2	2	1	2	1	2	1	5	3	8	6	9	7	8	6	6	4	N
SO	4	2	4	2	3	2	3	2	4	3	8	4	10	8	11	8	10	7	NO
O	6	3	4	3	4	3	5	3	6	5	7	4	9	6	13	8	12	8	O
NO	3	2	3	1	3	1	3	2	3	2	4	3	6	4	10	7	11	8	SO
N	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	3	3	3	S

- Temperatura equivalente techos. (° C)

TABLA DE TEMPERATURA EQUIVALENTE PARA TECHOS

Tiempo solar.

DESCRIPCION DE LOS MATERIALES DEL TECHO

A.M.				P.M.				
8	10	12	2	4	6	8	10	12

Techos expuestos al sol. Construcción ligera.

Madera de 1 plg	7	21	30	34	28	14	6	2	0
Madera de 1 plg y aislante									

Techos expuestos al sol. Construcción media.

Concreto de 2 plg.									
Concreto de 2 plg. y aislante	3	17	27	32	28	18	8	3	1
Madera de 2 plg.									

Concreto 4 plg.									
Concreto de 4 plg. y aislante	0	11	21	28	29	22	12	7	3

Techos expuestos al sol. Construcción pesada.

Concreto de 6 plg.	2	3	13	21	26	24	18	10	7
Concreto de 6 plg. y aislante	3	3	11	19	23	24	19	11	8

Techos en la sombra.

Construcción ligera	-2	0	3	7	8	7	4	1	0
Construcción media	-2	-1	1	4	7	7	6	3	1
Construcción pesada.	-1	-1	0	2	4	6	6	4	2

NOTAS: 1 TECHO CLARO = TECHO A LA SOMBRA + 55% DE LA DIFERENCIA DE TECHO A LA SOMBRA Y TECHO AL SOL

2 COLOR MEDIO = TECHO A LA SOMBRA + 80% DE LA DIFERENCIA DE TECHO A LA SOMBRA Y TECHO AL SOL

- Calor producido por personas

TABLA IX-7. Calor producido por las personas

Grado de actividad	Aplicación típica	Grupo de personas		Promedio de la relación metabólica Btu/h	Temperaturas del cuarto (°F, BS)											
		% de composición del grupo			80°F	78°F	75°F	70°F								
		Hombre	Mujer		Btu/h	Btu/h	Btu/h	Btu/h								
Relación metabólica de un hombre adulto Btu/h				Sens. Lat.	Sens. Lat.	Sens. Lat.	Sens. Lat.	Sens. Lat.	Sens. Lat.							
Sentado	Teatro	390	45	45	10	350	175	195	155	210	140	230	120	260	90	
Sentado; trabajo ligero	Escuela	450	50	50	0	400	180	220	195	205	215	185	240	160	275	125
Trabajo de oficina, hoteles, departamentos moderada	Oficinas, hoteles, departamentos	475	50	50	0	450	200	270	200	250	215	235	245	205	285	165
Parados; caminando despacio	Tienda de ropa, almacenes	550	10	70	20	450	200	270	200	250	215	280	245	205	285	165
Caminando; sentado, de pie; caminando despacio	Cafeterías, Bancos	550	20	70	10	500	180	320	200	300	220	280	255	245	290	210
Trabajo sedentario	Restaurantes	500	50	50	0	550	190	360	220	330	240	310	280	270	320	230
Trabajo ligero	Fábrica, trabajo ligero	800	60	40	0	750	190	560	220	530	245	505	295	455	365	285
Baile moderado	Salas de baile	900	50	50	0	850	220	630	245	605	275	575	325	525	400	450
Caminando, 3 mph	Fábricas, trabajo algo pesado	1,000	100	0	0	1,000	270	730	300	700	330	670	380	620	460	540
Jugando	Boliche	1,500	75	25	0	1,450	450	1,000	465	985	485	965	525	925	605	845

De *Modern Air Conditioning, Heating, and Ventilating*, 3ª edición, por Willis H. Carrier, Realto E. Cherne, Walter A. Grant y William H. Roberts, con autorización de Pitman Publishing Corporation.

1070
252 cal

- Calor producido por equipo

TABLA IX-8. Ganancia de calor debida al equipo misceláneo

Dispositivo	Calor disipado durante el funcionamiento (Btu/h)	
	Calor sensible	Calor latente
Luz eléctrica y aparatos eléctricos, por kw instalado	3,413
Motores con la carga aplicada en el mismo cuarto, por HP *		
De 1/8 — 1/2 HP	4,250
De 1/2 — 3 HP	3,700
De 3 — 20 HP	2,950
Cafetera eléctrica (3 galones)	2,200	1,500
Cafetera eléctrica (5 galones)	3,400	2,300
Estufa de gas	3,100	1,700
Calentador de agua	3,150	3,850
Horno doméstico de gas	8,100	4,000
Cafetera de gas (3 galones)	2,500	2,500
Cafetera de gas (5 galones)	3,900	3,900
Equipo calentado por vapor, por pie cuadrado **		
Superficies calentadas por vapor:		
Pulida	130
Sin pulir	330
Superficie aislada	80
Secadores de pelo para sala de belleza:		
Tipo soplador	2,300	400
Tipo casco	1,870	330
Restaurantes, por comida servida	30 (Btu)

* Con carga conectada fuera del cuarto, reste 2,544 Btu/h.

** Para equipo cubierto, reduzca los valores un 50 %.

De *Air Conditioning and Refrigeration*, 4ª edición, por Burgess H. Jennings y Samuel R. Lewis, con autorización de International Textbook Company.