



Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Notas sobre el curso de
Energía Solar

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
División de Ingeniería

Juan Jorge Hermsillo Villalobos
Coordinador

David Gudiño Ayala

Miryam Mendoza Ramírez
Editora

Tlaquepaque, Jalisco, Febrero de 1995

CONTENIDO

PARTE I. NATURALEZA DE LA ENERGIA SOLAR.

Capítulo 1. UNA JUSTIFICACION AL ESTUDIO DE LA ENERGIA SOLAR

- 1.1 Introducción, 3
- 1.2 Fuentes de energía no renovables, 4
 - 1. Fuentes de energía fósil, 4
 - 2. Energía geotérmica, 5
 - 3. Energía nuclear, 5
- 1.3 Fuentes de energía renovables, 5
 - 1. Energía solar, 6
 - 2. Energía eólica, 6
 - 3. Energía de biomasa, 6
 - 4. Diferencia de temperatura oceánica (OTEC), 6
 - 5. Energía de las olas, 6
 - 6. Energía hidráulica, 7
 - 7. Energía de las mareas, 7

Capítulo 2. NATURALEZA DE LA ENERGIA SOLAR

- 2.1 Introducción, 9
- 2.2 La constante solar, 10
- 2.3 La radiación normal extraterrestre, 10
- 2.4 Distribución espectral de la radiación solar, 11
- 2.5 Variación del flujo de energía con la distancia, 12
 - Ejercicios, 14

Capítulo 3. RADIACION SOLAR

- 3.1 Tipos de radiación y sus relaciones geométricas, 15
- 3.2 Cálculo de la irradiancia directa sobre una superficie, 16
- 3.3 Conversión de hora civil a hora solar, 18
 - Ejercicios, 21

Capítulo 4. ESTIMACION Y MEDICION DE LA RADIACION SOLAR

- 4.1 Cálculo de la radiación directa sobre una superficie horizontal, 23
- 4.2 Estimación de la radiación en un día despejado, 23
- 4.3 Medición de la radiación solar, 25

PARTE II. COLECCION Y ALMACENAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR.

Capítulo 5. COLECTORES PLANOS

- 5.1 Introducción, 31
- 5.2 Descripción general de un colector solar plano, 31
- 5.3 Tipos de colectores solares planos, 32
 - 1. Placas absorbedoras para calentamiento de líquidos, 32

- 2. Placas absorbedoras para calentamiento de gases, 33
- 5.4 Balance de energía en un colector solar plano, 33
- 5.5 Coeficiente total de pérdidas de calor, 37
- 5.6 Calor útil, 42
 - 1. Factor de eficiencia de la aleta, F1, 42
 - 2. Factor de eficiencia de la sección, F2, 43
 - 3. Factor de eficiencia global del colector, F3, 43
- Ejercicios, 47

Capítulo 6. COLECTORES CONCENTRADORES

- 6.1 Introducción, 49
- 6.2 Diferentes tipos de colectores concentradores, 49
 - 1. Tipos de concentradores, 50
 - 2. Tipos de receptores, 50
 - 3. Tipos de seguidores de sol, 50
- 6.3 Razón de concentración, 50
- 6.4 Concentradores de enfoque, 52
 - 1. Lentes de Fresnel, 53
 - 2. Concentradores parabólicos, 53
- 6.5 Concentradores fijos o semifijos, 54
 - 1. Concentrador parabólico compuesto (CPC), 57
- Ejercicios, 60

Capítulo 7. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

- 7.1 Introducción, 61
- 7.2 Sistemas pasivos, 61
- 7.3 Sistemas activos, 63
- 7.4 Almacenamiento por calor sensible o capacidad calorífica, 63
 - 1. Almacenamiento en agua, 65
 - 2. Almacenamiento en piedras o rocas, 67
- 7.5 Almacenamiento por calor latente o cambio de fase, 68
- 7.6 Almacenamiento en estanque solares, 71
- 7.7 Reacciones químicas, 72
- Ejercicios, 74

Capítulo 8. COLECTORES FOTOVOLTAICOS Y SUS APLICACIONES

- 8.1 Introducción, 75
- 8.2 Principios de operación y características, 75
 - 1. Efecto fotovoltaico, 75
 - 2. La celda fotovoltaica, 76
 - 3. Respuesta espectral de la célula de Silicio, 78
 - 4. Rendimiento del proceso fotovoltaico, 79
- 8.3 Tecnología de fabricación de células y módulos fotovoltaicos, 80
- 8.4 Estructura de un generador fotovoltaico, 82
- 8.5 Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos, 83
- Ejercicios, 84

PARTE III. APLICACIONES REALES Y POTENCIALES DE LA ENERGIA SOLAR.

Capítulo 9. CALEFACCION DE AGUA DOMESTICA

- 9.1 Introducción, 87
- 9.2 Principios de funcionamiento, 87
- 9.3 Tipos básicos de calentadores solares, 87
 - 1. Calentador solar autocontenido, 88
 - 2. Calentador solar por convección natural, 89
 - 3. Calentador solar con convección forzada, 91

Capítulo 10. CALENTAMIENTO DE ALBERCA

- 10.1 Introducción, 93
- 10.2 Balances de energía en una alberca, 93
- 10.3 Diseño de un colector de energía solar, 95
- 10.4 Estimación de la temperatura del agua de la alberca, 96
- 10.5 Cubiertas solares para albercas, 96
 - Ejercicos, 98

Capítulo 11. POTABILIZACION DE AGUA

- 11.1 Introducción, 99
- 11.2 Agua con contaminación microbiana ligera, 99
- 11.3 Agua con contaminación de sales disueltas, 99
- 11.4 El destilador solar de caseta, 100
 - 1. Colector solar, 100
 - 2. Evaporador, 100
 - 3. Cámara de aire, 101
 - 4. Condensador, 101
 - 5. Elementos para la colección del condensado 102
- 11.5 Productividad y operación de los destiladores solares, 102
- 11.6 Otros tipos de destiladores solares, 104
 - 1. Destilador solar de escalera, 104
 - 2. Destilador solar con evaporador textil, 104
 - 3. Destilador solar de múltiples efectos, 105
 - 4. Destilador solar indirecto, 105

Capítulo 12. SECADO SOLAR

- 12.1 Introducción, 107
- 12.2 El proceso de secado, 107
 - 1. Contenido de humedad de un producto, 108
 - 2. Contenido de humedad de equilibrio, 108
 - 3. Comportamiento general del secado. Velocidad de secado, 109
- 12.3 Características de un secador solar, 110
 - 1. Forma de calentamiento solar, 110

- 2. Circulación de aire, 111
- 3. Forma de operación, 111
- 4. Capacidad de producción, 111
- 12.4 Tipos de secadores solares, 112
- Ejercicios, 116

Capítulo 13. REFRIGERACION SOLAR

- 13.1 Introducción, 117
- 13.2 Aspectos teóricos sobre refrigeración, 118
 - 1. Fluidos refrigerantes, 120
- 13.3 Refrigeración por absorción, 121
 - 1. Sistema de refrigeración continua por absorción, 122
- 13.4 Refrigeración solar, 123
 - 1. Sistema de refrigeración solar continuo, 123
 - 2. Sistema de refrigeración solar intermitente, 125

BIBLIOGRAFIA, 131

APENDICE A. MODELO MATEMATICO PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE PERDIDAS DE CALOR POR LA PARTE SUPERIOR DE UN COLECTOR SOLAR.

APENDICE B. GRAFICAS PARA CALCULAR U_t , PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION DEL COLECTOR SOLAR.

APENDICE C. GRAFICAS DE RADIACION SOLAR.

APENDICE D. HOJA DE ESPECIFICACIONES DE PIRANOMETROS COMERCIALES.

PROLOGO

Los presentes apuntes se han desarrollado a lo largo de varios años de impartir el curso de Aplicaciones de la Energía Solar a alumnos de cuarto semestre de ingeniería química y de quinto y séptimo de ingeniería industrial del ITESO. Su contenido está dividido en tres grandes bloques: la primera parte es una introducción a los conceptos generales acerca de la naturaleza de la energía solar y principios que gobiernan su disponibilidad y aprovechamiento. La segunda parte contiene los principios físicos que se ven involucrados en la captación y almacenamiento de la energía solar. Por último, la tercera parte contiene algunas de las aplicaciones prácticas de esta forma de energía.

En todo el curso, pero especialmente en la última sección, ha influido la experiencia de más de una década de trabajo en el campo de la energía solar, realizado en el ITESO por los alumnos y profesores del antiguo Grupo Solar y Unidad Académica de Tecnología Intermedia, actualmente integrados al Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales de la División de Ingeniería.

Los profesores involucrados en este curso tenemos la intención de mejorar cada vez más la calidad de estos apuntes, para llegar en un futuro, a tener un texto adecuado para nuestros cursos.

Por este medio deseamos agradecer a nuestros alumnos de cursos anteriores que contribuyeron con sus preguntas, comentarios y observaciones al desarrollo de estas notas. Al mismo tiempo, deseamos invitar a nuestros alumnos actuales, así como a los demás miembros de la comunidad universitaria, a participar constructivamente en el mejoramiento de este material.

PARTE I

NATURALEZA DE LA ENERGIA SOLAR

UNA JUSTIFICACION AL ESTUDIO DE LA ENERGIA SOLAR

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCION.

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

Los recursos energéticos son usados por el hombre para satisfacer algunas de sus necesidades básicas en forma de **calor y trabajo**.

El calor es necesario para un sinnúmero de aplicaciones, como la climatización del espacio, la cocción de alimentos, o la producción o transformación de algunos compuestos químicos. La utilización doméstica del calor, con el dominio del fuego en las épocas prehistóricas y la invención de las máquinas térmicas a partir del siglo XVII, constituyen algunos de los logros tecnológicos más grandes en la historia de la humanidad.

El trabajo, por otro lado, se utiliza para una variedad de procesos en los que hay que vencer fuerzas de oposición: para levantar una masa en un campo gravitacional; para deformar un cuerpo, estirar una liga o un resorte o hacer fluir un líquido o gas; para la mayoría de los procesos industriales, al transformar materia prima en producto terminado; para el transporte de personas y de mercancías y hasta para tocar cualquier instrumento musical.

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

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

Las máquinas de vapor eran de "combustión externa". Este concepto implica que la fuente de calor que se utilice no es muy importante, siempre que cumpla con ciertos requisitos. Así, una máquina de vapor que puede funcionar con leña, también puede hacerlo con carbón, con petróleo o con ciertos residuos de basura. Hace más de cien años, se construyó en Francia una máquina de vapor cuya fuente de energía era el Sol.

Hacia mediados del siglo XIX se inventaron los primeros motores de combustión interna. Estos requieren un combustible muy específico para funcionar. Con el tiempo, debido a razones técnicas y económicas, los motores de combustión interna, principalmente los de gasolina y diesel, se hicieron cada vez más seguros, confiables, económicos y, por tanto, abundantes. Aparecieron también otras

máquinas térmicas, como las turbinas y los motores a reacción, que también consumen combustibles muy específicos. Fue así como nuestra sociedad se fue haciendo extraordinariamente dependiente de los combustibles fósiles.

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

Por otro lado, el consumo masivo de hidrocarburos está produciendo ya alteraciones de la atmósfera a nivel mundial. Los niveles de bióxido de carbono que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían en 1950. Esto produce el conocido **efecto invernadero**, que está produciendo ya un incremento en las temperaturas promedio mundiales. No es objeto de este curso discutir las implicaciones geográficas, biológicas, agrícolas, económicas y sociales de este calentamiento atmosférico, pero es obvio que una alteración artificial no controlada y con consecuencias que no conocemos, no puede ser deseable. Los combustibles fósiles también son causantes de la llamada **lluvia ácida**, que en los bosques cercanos a las áreas altamente industrializadas está causando grandes daños al suelo, y por tanto a la flora y la fauna. En las grandes ciudades, la combinación de las emisiones de gases de combustión, con algunos otros fenómenos naturales, como las inversiones térmicas, la humedad y la radiación solar produce algunos efectos indeseables para la salud humana, como el humo niebla (smog), las altas concentraciones de ozono y, en general, la concentración de componentes indeseables en la atmósfera.

Tanto por razones económicas (próxima escasez de hidrocarburos) como ecológicas (alteración de la atmósfera y el suelo), es imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean menos agresivas contra el ambiente. El actual esquema de consumo energético, tanto en México como a nivel global, simplemente no es sustentable, es decir, no puede mantenerse indefinidamente sin amenazar su propia existencia. Algunos modelos que consideran los efectos que está teniendo actualmente el uso y abuso de los combustibles fósiles, considerando las posibles tendencias futuras, amenazan con producir una catástrofe en contra de la humanidad, antes de que termine el siglo XXI.

Existen muchas alternativas energéticas. Algunas de ellas no han sido desarrolladas por limitaciones técnicas y económicas, otras se ha utilizado sólo parcialmente. A continuación damos un listado de las principales:

1.2 FUENTES DE ENERGÍA NO RENOVABLE.

Se considera no renovable la energía que está almacenada en cantidades inicialmente fijas, comúnmente en el subsuelo. A medida que se consume un recurso no renovable, se va agotando. Las reservas disponibles están sujetas a la factibilidad técnica y económica de su explotación, al descubrimiento de nuevos yacimientos y al ritmo de extracción y consumo.

1. Fuentes de Energía Fósil.

Se llama energía fósil la que se obtiene de la combustión (oxidación) de ciertas substancias que, según la geología, se produjeron en el subsuelo a partir de la acumulación de grandes cantidades de residuos de seres vivos, hace millones de años.

Petróleo y sus Derivados. El petróleo es una mezcla de una gran variedad de hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno) en fase líquida, mezclados con una variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos, se obtienen las diversas gasolinas, el diesel, la turbosina, la tractolina,

el chapopote, etc. En México este es un recurso abundante, pero muy sobreexplotado para fines energéticos y financieros. A nivel mundial ya no es un recurso abundante.

Gas Natural. El gas natural está compuesto principalmente por metano y corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por lo que se encuentra en los yacimientos en forma gaseosa. En México este recurso ha sido poco aprovechado.

Carbón Mineral. El carbón mineral es principalmente carbono, también de origen fósil, que se encuentra en grandes yacimientos en el subsuelo. A nivel mundial, el carbón mineral es abundante, pero no lo es en México. Los problemas ecológicos que causa son aún mayores que los inherentes al petróleo y sus derivados.

2. Energía Geotérmica.

La energía geotérmica consiste en extraer calor del magma incandescente de la Tierra, por medio de vapor. Mediante procesos térmicos, es posible generar electricidad, en las plantas llamadas "geotermoeléctricas". El magma se encuentra cerca de la superficie terrestre en las zonas con gran actividad volcánica, y es donde es más explotable. En algunos casos el vapor o el agua caliente brotan espontáneamente. En otros, es necesario inyectar agua en pozos y extraerla como vapor. México tiene gran riqueza geotérmica en algunas regiones, pero su principal aplicación ha sido en balnearios de aguas termales. Nótese que el aprovechamiento de la energía geotérmica no involucra una combustión.

3. Energía Nuclear.

La energía nuclear se obtiene de la modificación de los núcleos de algunos átomos, muy pesados o muy ligeros. En esta modificación, cierta fracción de su masa se transforma en energía. La liberación de energía nuclear, por tanto, tampoco involucra combustiones, pero sí produce otros subproductos agresivos al ambiente.

Fisión. La fisión nuclear consiste en la desintegración de átomos pesados, como ciertos isótopos del uranio y el plutonio, para obtener átomos más pequeños. Dentro de la fisión existen diversas variantes. Esta es la forma con que operan los reactores nucleares comerciales.

Fusión. La fusión nuclear consiste en obtener átomos de mayor tamaño, a partir de ciertos isótopos de átomos pequeños, como el tritio. Teóricamente ésta sería una fuente de energía abundante, debido a que existe una cierta fracción de tritio en el agua de los océanos. No se ha logrado desarrollar una técnica para aprovechar la fusión nuclear en la Tierra con fines pacíficos (como veremos, el Sol, como cualquier estrella, es un reactor nuclear de fusión).

1.3 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.

Se llama energía renovable la que, **administrada en forma adecuada**, puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. Para tener un esquema de desarrollo sustentable es indispensable que la mayoría de los recursos, y particularmente la energía, sean del tipo renovable.

La principal fuente de energía renovable es el Sol. Como se explicará más adelante, el Sol envía a la Tierra únicamente energía radiante, es decir, luz visible, radiación infrarroja y algo de ultravioleta. Sin embargo, en la atmósfera se convierte en una variedad de efectos, algunos de los cuales tienen importancia como recurso energético, tal es el caso de la energía eólica, la energía de la biomasa, la diferencia de temperaturas oceánicas y la energía de las olas, que a continuación se describirán en forma breve.

1. Energía Solar.

La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo.

Directa. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

Térmica. Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas. La mayoría de este curso se centra en este tipo de aprovechamiento de la energía solar.

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

2. Energía Eólica.

La energía eólica es la energía que se extrae del viento. Las aplicaciones más comunes son: transporte (veleros), generación eléctrica y bombeo de agua. La energía eólica es derivada de la energía solar, porque una parte de los movimientos del aire atmosférico se debe al calentamiento causado por el Sol (también existe un efecto de la rotación de la Tierra y otro de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol). En México hay regiones en donde la energía eólica es muy abundante: principalmente las costas y el Istmo de Tehuantepec.

3. Energía de la Biomasa (fotosíntesis).

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

4. Diferencia de Temperatura Oceánica (OTEC).

Se ha propuesto utilizar la diferencia de temperatura que existe entre la superficie del océano (unos 20°C o más en zonas tropicales) y la correspondiente a unas decenas de metros abajo de la superficie (cercana a 0°C), para proporcionar los flujos de calor para impulsar un ciclo termodinámico y producir otras formas de energía.

5. Energía de las Olas.

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

6. Energía Hidráulica.

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

7. Energía de las Mareas.

En algunas regiones costeras se dan unas mareas especialmente altas y bajas. En estos lugares se ha propuesto construir grandes represas costeras que permitirían generar energía eléctrica con grandes volúmenes de agua aunque con pequeñas diferencias de altura. Es como la energía hidráulica, pero su origen es la atracción gravitacional del Sol y principalmente de la Luna, en vez del ciclo hidrológico. En México, en general, este recurso no es abundante.

Como puede verificarse, en realidad no existe un problema de falta de recursos energéticos. Una parte del problema energético actual consiste en que nuestra sociedad se ha hecho muy dependiente de un sólo recurso: los hidrocarburos. En otras palabras, se ha rezagado el desarrollo tecnológico y, por tanto, la viabilidad económica de algunas otras alternativas energéticas.

El contenido de este curso está orientado hacia una introducción a la naturaleza y aplicaciones de la energía solar, sus posibles alcances y sus limitaciones. En el contexto que nos ocupa, la energía solar es una de las alternativas más interesantes por ser muy abundante en México y, al mismo tiempo, muy "amigable" con el ambiente. No es la única alternativa; y en muchos casos no es la mejor, o no es la más económica, pero existen ciertas aplicaciones actuales y otras potenciales, que vale la pena estudiar para ponerlas en funcionamiento siempre que sea posible. De esta forma se ahorran energéticos convencionales, se alarga su duración y se disminuye el impacto ambiental que implica su utilización.

NATURALEZA DE LA ENERGIA SOLAR

Capítulo 2

2.1 INTRODUCCIÓN.

Para los fines del aprovechamiento de su energía, el Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de $1.39 \times 10^9 \text{m}$, situado a la distancia media de $1.5 \times 10^{11} \text{m}$ respecto de la Tierra. Esta distancia se llama **unidad astronómica**.

Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe ser del orden de 10^7K , pero en la fotosfera, es decir, en la superficie **externa** del Sol, la temperatura "efectiva de cuerpo negro" es de 5762K (i.e., calculada según el modelo radio activo del cuerpo negro). Existen, sin embargo, otras formas de calcular la temperatura de la fotosfera, que dan como resultado alrededor de 6300K . Es claro que nadie ha colocado un termómetro en la superficie del Sol. Su temperatura se mide por métodos indirectos, basados en diversos modelos. De ahí que no coincidan todas las estimaciones de su temperatura.

Algunos datos interesantes acerca del Sol son los siguientes: el Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión -por ejemplo dos átomos de hidrógeno que producen helio, o uno de helio y uno de hidrógeno que producen litio, etc.- que se llevan a cabo en su núcleo. La generación de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein, $E = m c^2$, donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m; c es la velocidad de la luz.

El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro, que corresponde a tan sólo el 15% del volumen, pero en cambio contiene el 40% de la masa y ahí se genera el 90% de la energía. En esa región, la temperatura es del orden de 10^7K y la densidad es del orden de 10^5kg/m^3 . (Recordemos que la densidad del agua es 10^3kg/m^3).

A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura es del orden de 10^5K y la densidad es de unos 70kg/m^3 . La zona que va del 70% al 100% del radio solar, se conoce como **zona convectiva** y su temperatura cae hasta 5000 a 6000K , mientras que la densidad desciende a 10^{-5}kg/m^3 . La capa externa de esta región recibe el nombre de **fotosfera** y es considerada como la superficie del Sol, por ser ésta una región opaca, de donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio. (Nota: **opaco**, en óptica, significa que no deja pasar la radiación. Por ejemplo, un espejo es opaco. Una fuente luminosa puede ser opaca. Por ejemplo, una lámpara de neón, emite luz desde su superficie, pero no podemos ver su interior: es opaca. Por tanto, el significado técnico de esta palabra es diferente del que le damos en el lenguaje común. Técnicamente, lo opuesto a opaco es transparente).

La fotosfera es la superficie aparente del Sol cuando se observa con un filtro adecuado (filtro de soldador del #14, por ejemplo). Por ser opaca, la fotosfera impide observar el interior del Sol. Sin embargo, es claro que, como todo el Sol, desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida, como la hay en la Tierra. Sobre la fotosfera existen también gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, que se conocen como la **corona solar**, observable durante los eclipses totales de Sol. La corona solar es la atmósfera del Sol. De forma similar a como sucede en la Tierra, la corona es cada vez más tenue a medida que se está a mayor distancia del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

2.2 LA CONSTANTE SOLAR.

La combinación de tres factores: la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol, determinan un flujo luminoso, i.e., un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra. En esta y las próximas secciones, veremos cómo se calcula ese flujo de energía bajo diversas condiciones.

Se llama **flujo** de "algo" (materia, energía), la cantidad de ese "algo" que pasa a través de una superficie, **por unidad de área y por unidad de tiempo**. Por tanto, el flujo luminoso, que es un flujo de energía, tiene unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo, por ejemplo, $J s^{-1} m^{-2}$, equivalentes a $W m^{-2}$.

Mucho se ha discutido acerca de si el Sol emite un flujo de energía constante, o se trata de una estrella variable. Algunos estudios parecen indicar que la variación de la emisión de energía, por parte del Sol, es menor al 1% a lo largo de un ciclo solar, que dura 22 años. No se conoce a ciencia cierta la causa de estas variaciones. Sin embargo para los fines de este curso, por ejemplo, para su aplicación en el campo de la ingeniería, la emisión de energía en el Sol puede considerarse constante. El recurso energético solar está mucho más ligado, en la superficie terrestre, a las variaciones meteorológicas, que a las solares.

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

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

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

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

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

que, en otras unidades equivale a:

$$G_{sc} = 1.940 \text{ cal/cm}^2\text{min} = 428 \text{ Btu/ft}^2\text{hr} = 4871 \text{ MJ/m}^2\text{hr}$$

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

2.3 LA RADIACIÓN NORMAL EXTRATERRESTRE.

Como hemos expuesto, la radiación extraterrestre que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol.

Por otro lado, la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino cuasi-elíptica. La pequeña excentricidad de la órbita hace que, alrededor del 4 de enero, cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al Sol -sí: mínima-) la radiación solar extraterrestre sea máxima. Por otro lado, alrededor del 1 de julio -seis meses después- la Tierra se encuentra en el afelio (máxima distancia al Sol) y entonces la radiación solar extraterrestre es mínima.

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

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

en donde G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, y n es el número de día del año. La Tabla 2.1 contiene información para calcular el valor de n .

En la ecuación anterior, así como en el resto del curso, las normas para los subíndices son como sigue: el subíndice "sc" se usa para la constante solar (del inglés solar constant); el subíndice "o" se usa para la radiación extraterrestre, esto es, fuera de la atmósfera. Por último, el subíndice "n" se utiliza para la radiación medida en un plano normal a la dirección de propagación de la radiación. De esta forma, el subíndice "on" se utiliza para la radiación extraterrestre observada en un plano normal a la radiación.

2.4 DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada **radiación térmica** que incluye sólo el ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR).

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

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

La fotosfera se encuentra a unos 6000 K y, por tanto, emite un cierto flujo de energía correspondiente a esa temperatura. Su distribución espectral es como se indica en la Figura 2.1. Esta figura muestra la **irradiancia espectral** (energía por unidad de tiempo, en la unidad de área, por unidad de longitud de onda) en función de la longitud de onda. La línea continua pero irregular corresponde a la irradiancia observada, medida desde la Tierra. La curva punteada representa la irradiancia espectral que tendría un cuerpo negro (radiador ideal), que se encontrara a la temperatura de 5762 K. Esta temperatura corresponde a la que debería tener dicho radiador ideal, para tener la misma emisión de energía que el Sol.

Tabla 2.1. Ecuaciones para convertir el día del mes, en el número de día del año.

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

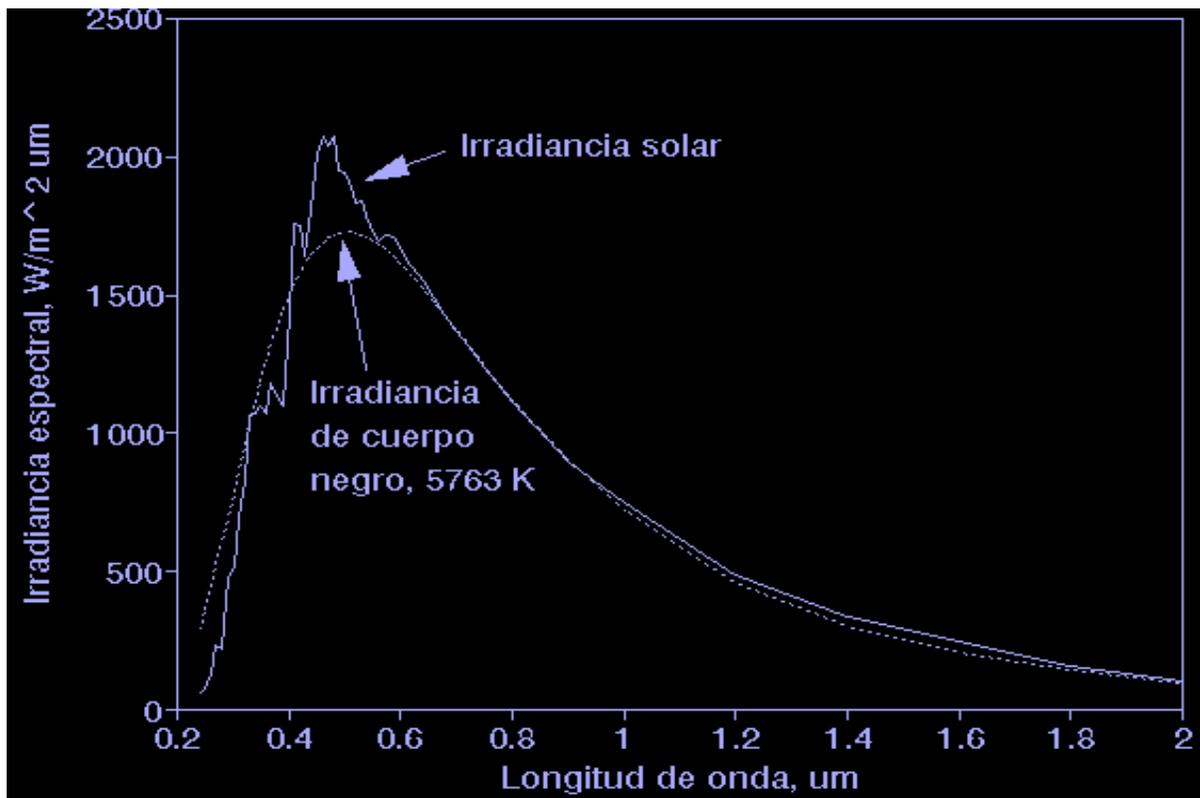


Figura 2.1. Irradiancia espectral del Sol y de un cuerpo negro a 5763 K.

2.5 VARIACIÓN DEL FLUJO DE ENERGÍA CON LA DISTANCIA.

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

Una deducción muy sencilla de esta expresión, puede hacerse como sigue. Considérese una fuente luminosa cualquiera: una bombilla incandescente, una estrella, el Sol, que emite energía en forma homogénea en todas direcciones. Considérense dos esferas concéntricas, de radios r_1 y r_2 , mucho mayores que el de la fuente luminosa, cuyo centro coincida exactamente con la posición de dicha fuente. Supongamos que medimos la intensidad luminosa (flujo de energía) en la superficie de la esfera con radio r_1 , y llamemos a ese valor G_1 . La potencia (energía por unidad de tiempo) que pasa a través

de la esfera completa estará dada por G_1 multiplicada por el área de la esfera:

$$Potencia_1 = 4\pi r_1^2 G_1 \quad (2.2)$$

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

$$Potencia_2 = 4\pi r_2^2 G_2 \quad (2.3)$$

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

$$Potencia_1 = Potencia_2 \quad (2.4)$$

entonces,

$$4\pi r_1^2 G_1 = 4\pi r_2^2 G_2 \quad (2.5)$$

la cual se reduce a la expresión:

$$G_1 r_1^2 = G_2 r_2^2 \quad (2.6)$$

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

Esta ecuación es de uso bastante general. Sirve para relacionar intensidades luminosas producidas por lámparas a ciertas distancias (útil en fotografía, por ejemplo), lo mismo que para calcular la constante solar en diversos planetas. Sin embargo, no se aplica para luz emitida por medio de reflectores parabólicos, láseres, etc., cuya emisión es dirigida y no cumple con la hipótesis de disiparse en todas direcciones.

EJERCICIOS

- 2.1 Tomando en cuenta la distancia media de la Tierra al Sol y el diámetro de éste, y suponiendo que no hay pérdidas de energía en el camino, calcular el flujo de energía que emite el Sol, considerando la constante solar como 1353 Wm^{-2} .
- 2.2 Suponer que una bombilla incandescente emite igual flujo de energía en todas direcciones. Suponer también que las bombillas incandescentes tienen un 100% de eficiencia (lo cual es muy lejano a la realidad, desde el punto de vista de producción de luz visible). ¿A qué distancia de un objeto hay que colocar un foco de 100 W para que produzca el mismo flujo de energía que el que produce el Sol sobre la Tierra?
- 2.3 Un Volkswagen Sedán desarrolla 44 h.p. Suponiendo que, a velocidad normal en carretera, la potencia desarrollada sea de 30 h.p., calcular el área de colector solar que sería necesaria para producir esa potencia. Suponer un 100% de eficiencia de colección de radiación extraterrestre, normal a la superficie del colector.
- 2.4 La Luna describe una trayectoria elíptica alrededor de la Tierra, a una distancia aproximada de 384,000 km de ésta. Calcular el flujo de energía que recibe del Sol cuando se encuentra en luna llena y luna nueva. Estimar si la Luna recibe, en promedio, mayor, menor o igual flujo luminoso que la Tierra.
- 2.5 Investigar: a) La cantidad de reservas de petróleo en México. b) Su equivalencia en unidades de energía. c) El área del territorio mexicano.
Suponiendo que, en promedio, el flujo de energía solar sobre el territorio mexicano, sea de la mitad que la constante solar, ¿en cuánto tiempo incide sobre nuestro país una energía equivalente a las reservas petroleras?

RADIACION SOLAR

Capítulo 3

3.1 TIPOS DE RADIACIÓN Y SUS RELACIONES GEOMETRICAS.

La radiación solar sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera, de modo que es necesario manejar algunos conceptos específicos para los diversos tipos de radiación. Las siguientes definiciones ayudan a aclarar estos conceptos.

Se conoce como **radiación directa**, la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa. Generalmente se usa el subíndice "b" para indicar radiación directa, por el término que se utiliza en inglés: beam (haz, rayo).

La **radiación difusa** es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna. Suele utilizarse el subíndice "d" para la radiación difusa.

Por otro lado, se conoce como **radiación terrestre** la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

Se conoce como **radiación total**, la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie. Por ejemplo, sobre una pared o una ventana, incide la radiación directa del Sol, la difundida por las nubes y por el cielo y, además, puede entrar la luz reflejada por algún otro objeto frente a la pared o ventana. Un caso particular, pero de mucho interés práctico en el estudio de la energía solar, es el medir la radiación total sobre una superficie horizontal "viendo" hacia arriba. En este caso puede considerarse que no existe radiación terrestre y se conoce también como **radiación global**. Por tanto, la radiación global es la suma de la directa más la difusa.

Para expresar la potencia solar -y en general, de cualquier radiación- se utiliza el término irradiancia. La **irradiancia**, $W\ m^2$, es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo G para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados: G_o , G_b , G_d , para la irradiancia extraterrestre, directa, difusa, etc. Nótese que la irradiancia tiene la virtud de indicar muy claramente que la radiación es un fenómeno que transcurre en el tiempo, que "va de pasada", que no es estático. Es energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía, por unidad de área, que incide durante un periodo de tiempo dado, recibe el nombre de **irradiación**, $J m^{-2}$, y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período en cuestión. Generalmente se usa el símbolo "I" para la insolación por hora, mientras que "H" se usa para la insolación en el período de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo: H_0 simboliza la irradiación extraterrestre en un día; I_d simboliza la irradiación difusa en una hora, etc.

De acuerdo con lo anterior, la relación entre la irradiación y la irradiancia está dada por la expresión:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (3.1)$$

en donde la irradiación se está calculando desde el tiempo t_1 hasta el tiempo t_2 y la irradiancia se considera función del tiempo.

3.2 CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE.

Consideremos por ahora el cálculo de la radiación directa sobre una superficie. El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación. La irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación (es decir, que le dé "de frente" o "de cara"). En cambio, será mínima si el plano es paralelo a la radiación (es decir "de canto"). La intensidad de radiación sobre la superficie dependerá pues, del ángulo Θ que forme la normal de la superficie, respecto de la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo Θ se conoce con el nombre de **ángulo de incidencia**. Entonces, la irradiancia incidente sobre la superficie será:

$$G_T = G_n \cos \Theta \quad (3.2)$$

en donde G_T se refiere a la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación (de "tilted") y G_n se refiere a la irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.

Si se conoce la irradiancia normal -por ejemplo, la constante solar G_{sc} es una irradiancia normal- y se conoce el ángulo Θ , mediante la ecuación anterior se puede calcular la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación. Como el Sol describe un movimiento aparente a lo largo del día (de oriente a poniente), y otro a lo largo del año (de sur a norte y viceversa), el valor del ángulo Θ varía con la fecha y la hora, además de hacerlo con la orientación del plano, su inclinación respecto de la horizontal

y la latitud geográfica del lugar donde se encuentre el plano en cuestión. Emplearemos la siguiente nomenclatura:

- ö (Phi) Simboliza la latitud geográfica, esto es, la posición angular del lugar en donde se encuentre el plano en cuestión, respecto del ecuador terrestre, positivo en el hemisferio norte. $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- ä (Delta) Declinación solar, i.e., la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto del plano

del ecuador, positivo hacia el norte. La declinación solar es cero el día que comienza la primavera y el día que comienza el otoño (equinoccios). En estos días, el Sol se encuentra en el ecuador celeste, que es la extrapolación del ecuador terrestre en la bóveda celeste. La declinación es máxima en el solsticio de verano ($23^{\circ} 27'$) y mínima en el solsticio de invierno ($-23^{\circ} 27'$). La declinación solar puede calcularse aproximadamente mediante la ecuación:

$$d = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.3)$$

β (Beta) Pendiente del plano sobre el cual incide la radiación, esto es, su inclinación respecto de la horizontal. En el intervalo $0 \leq \beta \leq 90^{\circ}$, la superficie "ve" hacia arriba, mientras que en el intervalo $90^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$, la superficie "ve" hacia abajo. Una azotea horizontal tendría $\beta = 0$, mientras que para una pared vertical, $\beta = 90^{\circ}$.

$\tilde{\alpha}$ (Gamma) Acimut de la superficie, i.e., el ángulo que forma la normal a la superficie, respecto del meridiano local. $\tilde{\alpha} = 0$ corresponde al sur. Hacia el este se consideran valores negativos y hacia el oeste positivos. Por ejemplo, una ventana que "ve" al poniente, tiene $\tilde{\alpha} = 90^{\circ}$, mientras que una hacia el norte, tiene $\tilde{\alpha} = 180^{\circ}$.

$\tilde{\omega}$ (Omega) Angulo horario, esto es, el desplazamiento angular del Sol, al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra a la velocidad angular de 15° por hora (360° en 24 horas). Negativo por la mañana y positivo por la tarde. Por ejemplo, si el mediodía solar es a las 12 hrs., a las 10 hrs. corresponde $\tilde{\omega} = -30^{\circ}$, mientras que a las 16 hrs. corresponde $\tilde{\omega} = 60^{\circ}$. El mediodía solar es, por definición, $\tilde{\omega} = 0$. Obsérvese que, debido a los movimientos del Sol hacia el norte (primavera) y hacia el sur (otoño), la salida y la puesta del Sol no corresponden, en general, a $\tilde{\omega} = -90^{\circ}$ y $\tilde{\omega} = 90^{\circ}$, respectivamente. Esto sucede únicamente en los equinoccios, en cualquier latitud, o en el ecuador, en cualquier fecha.

La siguiente ecuación relaciona el ángulo Θ con los ángulos anteriores y, aunque larga e impresionante, su aplicación es bastante simple, como se verá posteriormente:

$$\begin{aligned} \cos \Theta = & \operatorname{sen} d \operatorname{sen} f \cos b - \operatorname{sen} d \cos f \operatorname{sen} b \cos g \\ & + \cos d \cos f \cos b \cos w \\ & + \cos d \operatorname{sen} f \operatorname{sen} b \cos g \cos w \\ & + \cos d \operatorname{sen} b \operatorname{sen} g \operatorname{sen} w \end{aligned} \quad (3.4)$$

En la mayoría de las aplicaciones de esta ecuación, la única variable a lo largo del día es el ángulo horario $\tilde{\omega}$. Todo lo demás suele ser constante en una fecha y lugar determinados. Debido a esto, la ecuación tiene un gran número de constantes que, al aplicarla, simplifican mucho la expresión.

Para una **superficie horizontal**, $\beta = 0$, lo cual implica que $\operatorname{sen} \beta = 0$ mientras que $\cos \beta = 1$. En estas condiciones, desaparecen el segundo, cuarto y quinto términos de la ecuación anterior, con lo que se obtiene:

$$\cos q_z = \operatorname{sen} d \operatorname{sen} f + \cos d \cos f \cos w \quad (3.5)$$

En donde $\tilde{\epsilon}_z$ representa el ángulo de la posición del Sol respecto de la vertical (que es la normal al plano en cuestión), que se conoce con el nombre de **ángulo cenital**. Como $\tilde{\alpha}$ y $\tilde{\omega}$ son

constantes en una fecha y lugar determinados, la ecuación anterior puede expresarse en la forma más simplificada:

$$\cos \mathbf{q}_z = A + B \cos \mathbf{w} \quad (3.6)$$

donde $A = \text{sen} \delta \text{sen} \phi$ y $B = \text{cos} \delta \text{cos} \phi$. Esta ecuación tiene varias aplicaciones. Puede usarse para calcular la irradiancia en función del tiempo, a lo largo de un día, sobre un plano horizontal: un terreno, un estado, un país, etc. También puede usarse para calcular la hora de salida y puesta del Sol, haciendo la siguiente consideración.

Al salir el Sol, lo mismo que al ponerse, su ángulo cenital es de 90° , esto es, se encuentra a 90° de la vertical, no importa por dónde salga o se ponga; no importa si es invierno o verano. En esas condiciones, $\cos \hat{\mathbf{E}}_z = 0$. Por tanto, la ecuación anterior queda en la forma:

$$A + B \cos \mathbf{w}_s = 0 \quad (3.7)$$

que es una ecuación con una sola incógnita, donde $\hat{\mathbf{u}}_s$ es el ángulo horario a la salida y puesta del Sol (la ecuación tiene dos soluciones, iguales en valor absoluto, pero con diferente signo). Despejando $\hat{\mathbf{u}}_s$,

$$\mathbf{w}_s = \cos^{-1} \left(-\frac{A}{B} \right) = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.8)$$

Estas ecuaciones son válidas sólo en forma aproximada. No representan el método astronómico para calcular la salida y puesta del Sol. Además, el resultado se obtiene en términos del ángulo horario, y referido al mediodía solar. Para convertir esto a hora civil, es necesario hacer algunas correcciones que indicaremos posteriormente.

Otros casos útiles para el cálculo del $\cos \hat{\mathbf{E}}_z$ se obtienen cuando se considera que el plano sobre el cual incide la radiación puede moverse. Tal es el caso de los colectores concentradores, que deben "seguir" el movimiento del Sol. Algunos casos útiles son los siguientes:

Para un plano que gira alrededor de un eje horizontal en la dirección este-oeste con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia,

$$\cos \mathbf{q} = (1 - \cos^2 \delta \text{sen}^2 \mathbf{w})^{1/2} \quad (3.9)$$

Para un plano que gira alrededor de un eje norte-sur paralelo al eje de la Tierra, i.e., con una inclinación respecto de la horizontal igual a la latitud geográfica, y con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia,

$$\cos \mathbf{q} = \cos \delta \quad (3.10)$$

Por último, para un plano que se orienta todo el tiempo hacia la dirección del Sol es obvio que:

$$\cos \mathbf{q} = 1 \quad (3.11)$$

3.3 CONVERSIÓN DE HORA CIVIL A HORA SOLAR.

En la mayoría de los cálculos solares se requiere la hora solar, mientras que los relojes indican la hora civil. La **hora solar** es la que indica un reloj de Sol, i.e., el mediodía (12:00 hrs.) corresponde exactamente al paso del Sol por el meridiano. Como en la práctica esto haría que lugares relativamente cercanos tuvieran horas distintas, se han establecido los husos horarios. Esto evita, por ejemplo, que Mérida, México D.F., Querétaro, Morelia y Guadalajara tengan horas distintas, por estar cada una da ellas más al poniente que la anterior. Como en cada una de estas ciudades la hora solar es diferente, pero la hora civil es la misma, existe una diferencia entre ellas, dada por la ecuación:

$$hora\ solar = hora\ civil + 4 (L_{st} - L_{loc}) \quad (3.12)$$

Donde L_{st} corresponde a la longitud geográfica del meridiano de referencia, mientras que L_{loc} es la longitud geográfica del meridiano local. La tabla 4.2 contiene los meridianos de referencia para la República Mexicana.

Tabla 3.1. Meridianos de referencia para la República Mexicana y alrededores.

Hora	Meridiano de referencia	Ejemplos
del Este	75°W	Este de los EEUU, New York, etc.
del Centro	90°W	Este de México de Yuc. a Jal.
de la Montaña	105°W	Nay., Sin., Son. y BCS.
del Pacífico	120°W	Baja California, California.
Alaska-Hawaii	135°W	Alaska, Hawaii

En el caso de Guadalajara, el meridiano de referencia tiene $L_{st} = 90^\circ$, mientras que $L_{loc} = 103^\circ$. Esto hace que Guadalajara esté 13° al oeste del meridiano de referencia.

Supongamos que en cierto momento, el Sol se encuentra en este meridiano de referencia. (Que, por cierto, corresponde a Mérida, Yuc.). Entonces, en hora solar, en Mérida son las 12:00 hrs. Como el Sol "viaja" a 15° por hora hacia el oeste, tardará $13/15$ de hora en llegar al meridiano de Guadalajara. Esto equivale a 52 minutos. En otras palabras, cuando en el reloj "civil" de Guadalajara son las 12:00, faltan 52 minutos para que sea el mediodía solar. Y a la inversa, cuando es el mediodía solar, el reloj marca las 12:52 ¡casi la una de la tarde!

Otra corrección necesaria está dada por el hecho de que el Sol se adelanta y se atrasa respecto de la hora solar media, debido a dos efectos astronómicamente bien conocidos y estudiados: la excentricidad de la órbita terrestre y la inclinación del eje polar de la Tierra respecto de la órbita. Esto da lugar a otra corrección que se conoce como la **ecuación del tiempo**, que está dada por la expresión:

$$E = 9.87 \text{ sen}2B - 7.53 \text{ cos } B - 1.5 \text{ sen}B \quad (3.13)$$

donde

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (3.14)$$

y n es el número de día del año. Entonces, la ecuación para convertir de hora civil a hora solar queda:

$$\text{hora solar} = \text{hora civil} + B$$

La figura 3.1 muestra una gráfica de la ecuación del tiempo, según las ecuaciones anteriores. Nótese que el Sol se "atrassa o se adelanta", según la fecha, hasta más de 15 minutos, respecto de la hora solar media. Aunque para cálculos aproximados se puede despreciar la ecuación del tiempo, en términos generales no es despreciable esta corrección.

La ecuación del tiempo se traduce físicamente, por ejemplo, en que el mediodía solar varía de una fecha a otra, efecto que se suma a la variación debida al meridiano de referencia. Por otro lado, la combinación de la ecuación del tiempo, junto con el de la declinación del Sol a lo largo del año (efectos separados, que no coinciden) y otros factores que no expondremos, se traducen en una variación en las horas de salida y puesta del Sol, todavía mayor que lo anterior. Algunos datos para Guadalajara, como complemento de esto, están dados en la tabla 4.3. Nótese que, aunque el "día más largo" es el del solsticio de verano y el "más corto" el del de invierno, estos no coinciden con las fechas extremas de salida y puesta del Sol.

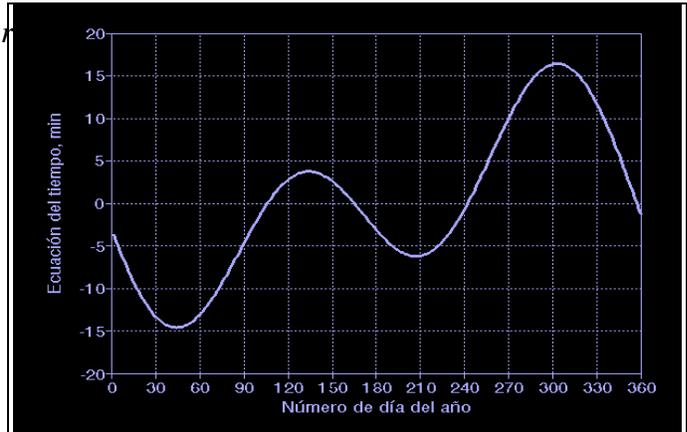


Figura 3.1. Ecuación del tiempo a lo largo del año.

Tabla 3.2. Algunos datos de salida y puesta del Sol para Guadalajara.

Fenómeno	Fecha	Hora
Salida del Sol más temprano	06/jun	06:12
Salida del Sol más tarde	17/ene	07:32
Máxima diferencia: 1:20		
Mediodía más temprano	03/nov	12:37
Mediodía más tarde	11/feb	13:07
Máxima diferencia: 0:30		
Puesta del Sol más temprano	25/nov	18:11
Puesta del Sol más tarde	03/jun	19:39
Máxima diferencia: 1:27		

EJERCICIOS

- 3.1 a) Calcular la hora solar de salida y puesta del Sol para las siguientes fechas, en Guadalajara, Jal., ($\phi = 20^{\circ}40'$):
- 21 de marzo (equinoccio de primavera).
 - 21 de junio (solsticio de verano).
 - 22 de diciembre (solsticio de invierno).
- b) Calcular la irradiancia extraterrestre sobre un plano horizontal situado en Guadalajara, para cada hora desde la salida hasta la puesta, en las mismas fechas.
- c) Hacer una gráfica irradiancia vs. tiempo, con los datos del inciso anterior.
- 3.2 Estimar la irradiación diaria en Guadalajara, en un día de invierno y en un día de verano.
- 3.3 ¿Por dónde sale el Sol en las fechas del problema 1? (Calcular el acimut del Sol al salir del horizonte).
- 3.4 Los dueños de una tienda de ropa fina, en Guadalajara, desean instalar un toldo para sombrear un aparador que está orientado hacia el sur. El toldo debe sombrear la ventana del aparador de las 10:00 a las 14:00 (hora solar). Si la ventana tiene 2.5 m de altura, con su base a 0.5 m sobre el nivel del piso y el toldo deberá colocarse por lo menos a 4.0 m sobre ese nivel, ¿cuál será la distancia mínima que el toldo deberá sobresalir de la pared?

ESTIMACION Y MEDICION DE LA RADIACION SOLAR

Capítulo 4

4.1 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL.

Un caso particularmente interesante, para el cálculo de la radiación directa (irradiancia e irradiación), es el que se refiere a una superficie horizontal. Combinando algunas de las ecuaciones anteriores (2.1 y 3.2), tendremos que la irradiancia directa, sobre un plano horizontal es:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \cos \mathbf{q}_z \quad (4.22)$$

donde G_{sc} es la constante solar, n es el número de día del año y $\hat{\mathbf{e}}_z$ es el ángulo cenital. Combinando esta expresión con la del coseno del ángulo cenital, se obtiene la ecuación para la irradiancia directa sobre un plano horizontal, en cualquier fecha (n , ã), cualquier lugar (\ddot{o}) y cualquier hora (\grave{u}):

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] (\sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d} + \cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} \cos \mathbf{w}) \quad (4.23)$$

Integrando esta ecuación, desde la salida hasta la puesta del Sol, se obtiene la irradiación a lo largo de un día, H_o . Sólo es necesario calcular previamente el ángulo horario a la puesta del Sol, \grave{u}_s , como se indicó anteriormente (ecuación 3.8):

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\mathbf{p}} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \left(\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} \sin \mathbf{w}_s + \frac{2 \mathbf{p} \mathbf{w}_s}{360} \sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d} \right)$$

En esta ecuación, la irradiación H_o está dada en $J m^2$. Por último, una expresión para calcular la irradiación incidente en un plano horizontal, I_o , desde un tiempo inicial hasta un tiempo final, con ángulos horarios \grave{u}_1 y \grave{u}_2 , respectivamente, en $J m^2$, es:

$$I_o = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\mathbf{p}} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right] \times \left[\cos \mathbf{f} \cos \mathbf{d} (\sin \mathbf{w}_2 - \sin \mathbf{w}_1) + \frac{2 \mathbf{p} (\mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_1)}{360} \sin \mathbf{f} \sin \mathbf{d} \right]$$

4.2 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN EN UN DÍA DESPEJADO.

Hasta ahora sólo hemos calculado la radiación extraterrestre. La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un **albedo** (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa.

Es muy difícil desarrollar modelos para predecir con precisión la presencia de nubes (posición, densidad, etc.). Existen modelos para predicción de "días promedio" en cierta fecha, pero no para fechas específicas. Por otro lado, desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía solar, no es interesante la predicción para fechas específicas, pese a que para los meteorólogos éste sea un reto interesantísimo.

En cambio, existe una diversidad de modelos para estimar la radiación solar para días despejados. Básicamente, estos modelos aplican un factor de **transmitancia** a la radiación extraterrestre. Así, las ecuaciones para la irradiancia e irradiación en períodos cortos, quedan de la siguiente forma. Para la irradiancia directa (sub b), normal a la superficie de interés (sub n), en una atmósfera clara (sub c), se tiene G_{cnb} :

$$G_{cnb} = t_b G_{on}$$

Por otro lado, para estimar la irradiancia directa sobre una superficie horizontal en una atmósfera clara, se usa G_{cb} , dado por la ecuación:

$$G_{cb} = t_b G_{on} \cos q_z = t_b G_o$$

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

$$I_{cb} = t_b I_{on} \cos q_z$$

Como puede suponerse ahora, el problema consiste en el cálculo o la estimación de la transmitancia atmosférica para la radiación directa, \hat{o}_b y para la difusa, \hat{o}_d . Existen varios modelos para ello. En este curso utilizaremos el que se conoce como "modelo de Hottel" (1976). Este modelo expresa la transmitancia atmosférica, en función del ángulo cenital (mayor transmitancia en dirección vertical, menor hacia el horizonte), de la altura sobre el nivel del mar (mayor transmitancia a mayor altura) y del tipo de clima. El modelo de Hottel es de la forma:

$$t_b = a_o + a_1 e^{-k/\cos q_z}$$

en donde a_o , a_1 y k son parámetros ajustados empíricamente. Para el cálculo de estas cantidades, que viene siendo la corrección por altura y tipo de clima, se usan las ecuaciones:

$$a_o = r_o [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2]$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2]$$

$$k = r_k [0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2]$$

donde A es la altura sobre el nivel del mar, en kilómetros. Los valores de las diversas r están dadas en la tabla 4.1, para diversos tipos de clima.

Entonces, el procedimiento para la utilización de este modelo atmosférico sería: dadas la latitud geográfica, la fecha y la hora, se calcula el coseno del ángulo cenital, según lo expuesto anteriormente.

Entonces,

- 1) Escoger un tipo de clima de la tabla 4.1.
- 2) Sabiendo la altura sobre el nivel del mar, sustituir estos valores en la ecuación para a_o , a_1 y k .
- 3) Calcular la transmitancia atmosférica a la radiación directa, según el $\cos \theta_z$ calculado.
- 4) Aplicar este valor a la irradiancia directa, o a la irradiación directa en el período de una hora.

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

$$t_d = 0.2710 - 0.2939 t_b \quad (4.31)$$

Entonces, la transmitancia a la radiación directa, obtenida anteriormente, se substituye en ésta, para obtener δ_d . La irradiancia difusa estará dada por la ecuación:

$$G_{cd} = t_d G_{on} \cos q_z$$

o, para un intervalo de una hora,

$$I_{cd} = t_d I_{on} \cos q_z = t_d I_o$$

y la irradiación e irradiancia total estarán dadas por las ecuaciones:

$$G_c = G_{cb} + G_{cd} \quad y \quad I_c = I_{cb} + I_{cd}$$

Tabla 4.4. Factores de corrección para algunos tipos de climas.

Tipo de clima	r_o	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano, latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano, sub-ártico	0.99	0.99	1.01
Invierno, lat. media	1.03	1.01	1.00

4.3 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.

Para muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector.

Existen varios métodos para medir la radiación solar, ya sea en forma de irradiancia o de irradiación. El método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro.

Un **piranómetro**, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal.

El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecido y el otro, protegido de la radiación. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos. La hipótesis de trabajo de un piranómetro, es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores. Para evitar ruido en las lecturas, causado por el viento y otros factores meteorológicos, el sensor expuesto a la radiación (y a veces también el otro) suelen estar protegidos por un hemisferio de vidrio. Este hemisferio, de características ópticas adecuadas, permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento por viento, lo cual alteraría la lectura.

La figura 4.1 muestra un esquema de un piranómetro. El anexo D se encuentra información sobre algunos de los piranómetros comerciales más reconocidos por su exactitud y precisión.

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

Otro instrumento para medir radiación solar es el piroheliómetro. El **piroheliómetro** es un instrumento que se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos. Es decir, es un instrumento que mide radiación directa. A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir el Sol con gran precisión.



Figura 4.1. Esquema de un piranómetro.

La información generada por un piranómetro debe ser registrada, ya sea por un método gráfico o electrónico. Esto permite entonces integrar las irradiancias en períodos dados, para obtener la irradiación correspondiente. La figura 4.2 muestra la pantalla de un programa de cómputo desarrollado en el Grupo Solar, que permite recuperar la lectura del piranómetro, además de permitir el cálculo de la irradiancia en atmósfera clara y extraterrestre.

Cuando la irradiancia medida está muy por debajo de la de atmósfera clara, se debe generalmente a la aparición de nublados (suponiendo que no se trata de la sombra de un árbol, o de un eclipse). Por otro lado, ocasionalmente puede ocurrir que la radiación medida sea mayor que la calculada con el modelo de atmósfera clara. Esto puede suceder por varias razones: a) porque efectivamente haya una mayor irradiancia que la calculada, b) porque las nubes que rodean al Sol (aparentemente) produzcan un efecto de concentración de la radiación, exagerando la lectura y c) por defecto del instrumento, que no responda adecuadamente a ciertas condiciones meteorológicas.

En el anexo C se muestran los mapas de irradiación global diaria promedio mensual y el promedio de irradiación anual de la República Mexicana.

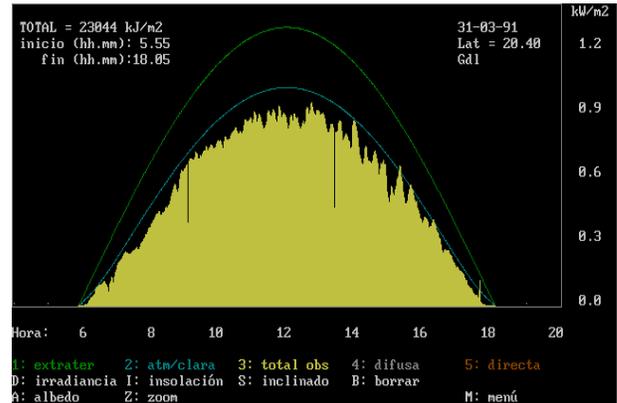


Figura 4.6. Pantalla del programa Datasol, que muestra la radiación medida y calculada con dos modelos.

PARTE II

COLECCION Y ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

COLECTORES SOLARES PLANOS

Capítulo 5

5.1 INTRODUCCIÓN.

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5 μm) y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar como máximo, flujos de 1100 W/m². De esta forma, un análisis de colectores solares presenta problemas relacionados con radiación y flujos de energía pequeños y variables.

Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los **colectores solares planos** son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C.

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos.

En este capítulo se analizará detalladamente el funcionamiento térmico teórico de los colectores solares planos, donde se verá que función juega cada una de sus partes. Aunque en general el análisis se hace para colectores que utilizan un líquido como fluido de trabajo, haciendo pequeños cambios convenientes, este también sirve para colectores que trabajan con gases. En general, cuando se hable de un líquido, se tratará de agua fluyendo a través de un tubo y cuando se hable de un gas, entenderemos que es aire fluyendo por un ducto que puede tener muy diversas formas.

5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.

Las partes más importantes de un colector solar plano se presentan en la figura 5.1. Esta muestra un corte transversal de uno de estos dispositivos que maneja un líquido como fluido de trabajo. En el diagrama se puede observar que la energía solar incidente, tiene que atravesar una o varias capas de vidrio o algún otro material transparente adecuado, antes de alcanzar la placa de absorción negra que es el elemento más importante del colector solar, al cual está unido el tubo o ducto. En esta placa, es donde la energía radiante es convertida en calor. Este calor, posteriormente es transferido por conducción hacia el fluido de trabajo (agua, aire), que es el que finalmente remueve la energía térmica del colector y la transfiere al tanque de almacenamiento térmico o al espacio o producto que va a ser calentado, según la aplicación que se le esté dando. El vidrio o su equivalente, además de permitir la entrada de la radiación solar hasta la placa de absorción, sirve también para minimizar las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del colector.

El aislante térmico (espuma de poliuretano, poliestireno, lana de fibra de vidrio o algún otro) colocado en la parte posterior y lados del colector, disminuye también las pérdidas de calor hacia el medio ambiente en esas partes. Todas las partes mencionadas se encuentran dentro de una caja que sirve como parte estructural del colector y que puede ser hecha de diversos materiales como lámina metálica, madera o plástico.



Figura 5.1. Corte transversal de un colector solar plano, donde se pueden observar todas sus partes.

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

Algunos de los parámetros más importantes que se tienen que tomar en cuenta para su diseño y funcionamiento, son los siguientes: tipo de tubo o ducto, diámetro nominal, longitud, número de tubos y espaciamiento entre ellos; material, espesor y acabado de la placa de absorción o aleta; número y tipo de capas o cubiertas transparentes; tipo de aislante y espesor; tipo de fluido de trabajo y flujo de masa del mismo; inclinación y orientación del colector; condiciones ambientales como velocidad del viento y temperatura del aire y, por supuesto, la intensidad de la radiación solar.

5.3 TIPOS DE COLECTORES SOLARES PLANOS.

Los colectores solares planos pueden ser divididos en dos categorías básicas: los que utilizan como fluido de trabajo un líquido (agua) y los que utilizan un gas (aire). En general los que calientan aire manejan flujos mucho más grandes que los que calientan agua. También podemos decir que cuando se trabaja con un líquido, este fluye normalmente por un tubo adherido a la placa absorbadora o aleta; mientras que cuando se utiliza un gas, este fluye por un ducto que forma parte de la placa de absorción y que además puede tener muy diversas formas.

1. Placas absorbadoras para calentamiento de líquidos.

En la figura 5.2 se presenta una serie de secciones transversales de placas de absorción (tubo y aleta) que utilizan un líquido como fluido de trabajo. Como se observa en la figura, pueden existir diversas configuraciones. El tubo puede estar en la parte superior [(c) y (d)] o posterior [(a) y (e)] de la aleta o placa. También puede estar unido a ella mediante soldadura apropiada (a), algún pegamento especial que contenga trozos de metal conductor como bronce (c) o simplemente adherido a la placa

mediante una obstrucción practicada a la misma para ese fin [(d) y (e)]. Existen también otros tipos de colectores planos que integran el tubo a la placa absorbedora y que no es precisamente de sección circular (b).

En general las placas de absorción pueden estar formadas por tubos con aleta individuales o bien, utilizando una sola placa de absorción, a la cual se le adhieren los tubos mediante los mecanismos antes mencionados.

2. Placas absorbedoras para calentamiento de gases.

Al igual que en el caso anterior, pueden existir un gran número de configuraciones de placas de absorción para el calentamiento de gases. En la figura 5.3, se muestra una serie de perfiles de este tipo de placas absorbedoras. En general se pretende que dentro del colector haya una gran área de contacto entre la placa absorbedora y el aire circulando a través del colector, para asegurar una buena transferencia de calor. Estudios de laboratorio indican que el área de absorción debe ser entre 2 y 4 veces el área de vidrio expuesto al sol.

En este tipo de colectores, la placa de absorción se coloca unos cuantos centímetros por arriba del aislante térmico, de manera que el aire fluya entre estos dos componentes, aunque también podría fluir por el hueco que queda entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio.

La placa absorbedora puede ser una simple lámina con aletas (a), una lámina corrugada (b), una serie de ductos grandes hechos de lámina (c), un relleno de metal o mallas de forma entrecruzada para formar una matriz absorbedora (d) o una lámina en forma triangulada para dar más área de contacto al colector (e).

5.4 BALANCE DE ENERGÍA EN UN COLECTOR SOLAR PLANO.

En estado estable, el funcionamiento de un colector solar plano se puede describir mediante un balance de energía. Este se puede representar de manera sencilla mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + du/dt \quad (5.35)$$

donde Q_{abs} es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector (W), Q_u el calor útil que finalmente se transfiere al fluido de trabajo (W), Q_L las pérdidas de calor hacia los alrededores por radiación, convección y conducción (W) y du/dt la rapidez de el cambio de energía interna almacenada en el colector (W). El valor del último término es muy pequeño y generalmente se desprecia.

Figura 5.2. Sección transversal de diferentes tipos de placas absorbedoras para colectores solares planos, que utilizan como fluido de trabajo un líquido.

Figura 5.3. Sección transversal de diferentes tipos de colectores solares planos, que utilizan gas como fluido de trabajo.

Haciendo un desglose más detallado de los términos de la ecuación anterior, encontramos que cada uno de ellos puede ser representado por otra ecuación. Así,

$$Q_{abs} = H_T A_c (\tau \alpha) \quad (5.36)$$

$$Q_u = m C_p dT/dt \quad (5.37)$$

$$Q_L = U_L A_c (T_{pm} - T_a) \quad (5.38)$$

donde, para la ecuación (5.2),

$$(\tau \alpha) = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \quad (5.39)$$

y referente a las demás variables, H_T es la energía solar incidente (W/m^2), A_c el área efectiva del colector (m^2), $(\tau \alpha)$ el producto de la transmitancia del vidrio y la absorptancia de la placa colectora que representa la fracción de la radiación solar que es absorbida por el colector, mC_p la capacidad calorífica del fluido de trabajo ($J/^\circ C$), dT/dt la rapidez de cambio de temperatura con respecto al tiempo ($^\circ C/s$), U_L el coeficiente global de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción ($W/m^2^\circ C$), $T_{p,m}$ la temperatura media de la placa de absorción ($^\circ C$), T_a la temperatura del aire ambiente ($^\circ C$) y ρ_d la reflectancia difusa. El valor de ρ_d toma diferentes valores según el número de cubiertas que se utilicen. Así, para 1, 2, 3 y 4 cubiertas, los valores de ρ_d son aproximadamente 0.16, 0.24, 0.29 y 0.32, respectivamente.

Sustituyendo algunas ecuaciones y reordenando la ecuación (5.1) tenemos que:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (5.40)$$

donde $S = H_T(\tau \alpha)$, o sea la energía absorbida en el colector por unidad de área.

Esta ecuación es fundamental en el análisis del funcionamiento de un colector solar. El único problema es que el calor útil queda como función de la $T_{p,m}$ que es difícil de calcular o medir, debido a que ésta es función del diseño del colector y de variables que cambian continuamente con el tiempo como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector. Debido a esto, parte de este capítulo se destina a modificar la ecuación para que quede en términos de variables que si puedan ser calculadas o medidas más fácilmente.

Por otro lado, tenemos que la forma de medir el funcionamiento del colector es mediante la eficiencia de colección (η_c). Esta se define como la relación entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo período de tiempo. Analíticamente se representa,

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_T A_c} \quad (5.41)$$

De la ecuación anterior, vemos que se hace necesario conocer el calor útil para poder calcular la eficiencia del colector. Si se quiere conocer Q_u por medio de la ecuación (5.6), primero se tienen que

conocer las pérdidas de calor, que son función del coeficiente total de pérdidas de calor, U_L . Conociendo alguno de estos dos términos, Q_u o Q_L , podemos resolver la ecuación del balance de energía, dado que el calor absorbido lo podemos obtener por medición experimental y conociendo las características ópticas (α_a) de los materiales utilizados en la construcción del colector. A continuación se analiza cómo podemos evaluar alguna de las variables mencionadas para poder conocer el funcionamiento del colector.

5.5 COEFICIENTE TOTAL DE PÉRDIDAS DE CALOR.

Aunque aparentemente la ecuación (5.4), que representa las pérdidas de calor, es sencilla; la evaluación numérica del coeficiente total de pérdidas de calor (U_L) requiere de un análisis detallado. Debido a que es indispensable conocer el valor de U_L para poder evaluar el calor útil o las pérdidas de calor, a continuación se presenta un modelo matemático de cómo obtenerlo. El modelo toma en cuenta cómo contribuyen las distintas pérdidas de calor al coeficiente total, dando la oportunidad de analizar cada una por separado, y además hace los siguientes supuestos:

1. El colector opera en estado estable.
2. Los cabezales proveen un flujo uniforme por los tubos.
3. La absorción de la energía solar en las cubiertas es despreciable.
4. El flujo de calor a través de las cubiertas y el fondo del colector es unidimensional.
5. Las cubiertas son opacas a la radiación infrarroja.
6. La irradiación sobre la superficie del colector es uniforme.
7. El firmamento se comporta como un cuerpo negro que emite radiación infrarroja a una temperatura equivalente.

El proceso para calcular U_L se basa en un circuito térmico de un colector solar como el que se presenta en la figura 5.4.a a 5.4.c, que en este caso utiliza dos cubiertas de vidrio, $c1$ y $c2$. Este nos muestra que, de la energía absorbida en el colector (S) a través de la placa absorbidora (p), que se encuentra a la temperatura T_p ; parte se convierte en calor útil (Q_u) y parte tiende a disiparse hacia los alrededores que se encuentran a la temperatura ambiente T_a , a través de las cubiertas de vidrio que se encuentran respectivamente a las temperaturas T_{c1} y T_{c2} . Esto también ocurre a través del fondo y lados del colector que se encuentran a una temperatura T_b . La cantidad de energía disipada depende de las diversas resistencias que vienen esquematizadas en el diagrama y que en este caso son 5.

De la figura 5.4.a, se puede observar que las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_5 , son a la vez resistencias equivalentes que representan la oposición a las pérdidas de calor por convección ($1/h$) y radiación ($1/h_r$) a través de la parte superior y posterior del colector. R_4 constituye la resistencia a la conducción a través del aislante térmico por la parte posterior y lados del colector. La R_5 es usualmente muy pequeña y por lo tanto despreciable. La idea es tratar de obtener una resistencia equivalente (R_{eq}) como la que representa la figura 5.4.c. Esta resistencia es igual al inverso del coeficiente total de pérdidas de calor, $R_{eq} = 1/U_L$.

Podemos decir entonces, que U_L es la suma de varios coeficientes de pérdidas de calor, que se pueden expresar también como el inverso de sus resistencias, así:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (8)$$

donde U_t es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector, y es igual al inverso de la suma de las primeras tres resistencias,

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.43)$$

y U_b y U_e , son los coeficientes de pérdida de calor por conducción por el fondo y lados respectivamente, que tienen que ver con R_4 . Además, estos coeficientes también tienen relación con las dimensiones del colector y el tipo y grosor del aislante utilizado, de manera que podemos escribir las siguientes relaciones:

$$(U_b + U_e) = \frac{1}{R_4} \quad (5.44)$$

donde, por otro lado,

$$U_b = \frac{k_a}{l} \quad (5.45)$$

y

$$U_e = \frac{k_a M P}{l' A_c} \quad (5.46)$$

En estas ecuaciones, k_a es la conductividad térmica del aislante, l y l' los espesores del aislante por el fondo y lados respectivamente, P el perímetro del colector y M la altura del mismo. En estas dos últimas ecuaciones, todas las variables pueden ser conocidas de manera que se pueden obtener los valores de U_b y U_e .

Para calcular el valor de U_t , se considera que las pérdidas de calor por la parte superior, son el resultado de la convección y radiación entre dos placas paralelas con una inclinación de 45° . Existe un análisis matemático detallado para calcular el valor de U_t , que se presenta en el **apéndice A**. Aquí, por razones de brevedad, sólo se presenta una ecuación simplificada de ese procedimiento y con ella se tiene un cálculo bastante aproximado de U_t . Otra manera de obtener un valor semejante del coeficiente de pérdidas de calor por la parte superior, es utilizando diversas gráficas de U_t en función de la temperatura promedio de la placa absorbadora, para diferente número de cubiertas, para diversos valores de el coeficiente de pérdidas de calor por convección debida a la velocidad del viento (hw) y para diferentes valores de la emisividad de la placa absorbadora ($\hat{\alpha}_p$). Estas gráficas se presentan en el **apéndice B**.

La ecuación simplificada del procedimiento matemático para obtener U_t para un colector que tiene una inclinación de 45° , se presenta a continuación:

$$U_i = \left(\frac{N}{(344/T_p)(T_p - T_a)/(N + f)^{0.31} + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} \quad (5.47)$$

$$+ \left(\frac{\mathbf{S}(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[e_p + 0.0425N(1 - e_p)]^{-1} + \frac{(2N + f - 1)}{e_c} - N} \right)$$

donde

$$f = (1 - 0.04 h_w + 0.0005 h_w^2)(1 + 0.058N) \quad (5.48)$$

y h_w que es el coeficiente de transferencia de calor por convección debido al aire soplando sobre la cubierta de vidrio y es igual a:

$$h_w = 5.7 + 3.8(v) \quad (5.49)$$

donde v es la velocidad del viento.

Figura 5.4. Circuito térmico para un colector plano con dos cubiertas. (a) En términos de resistencias por conducción, convección y radiación. (b) En términos de resistencias por placas. (c) Equivalente

Los demás parámetros en estas ecuaciones son los siguientes: N que es igual al número de cubiertas de vidrio, $\hat{\alpha}_p$ la emitancia infrarroja de la placa, $\hat{\alpha}_c$ la emitancia infrarroja de la cubierta interior y σ la constante de radiación de Stefan-Boltzmann ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

Para calcular el valor de U_t a cualquier ángulo s , se utiliza la ecuación:

$$\frac{U_t}{U_{t,45^\circ}} = 1 - (s - 45)(0.00259 - 0.00144 e_p) \quad (5.50)$$

Ejemplo 5.1

Calcular el coeficiente total de pérdidas de calor, U_L , para un colector plano con una sola cubierta de vidrio, que mide 1.20 m de largo por 0.70 m de ancho y que tiene las siguientes características:

Emitancia de la placa de absorción (pintura negra)	0.90
Emitancia del vidrio en el infrarrojo	0.88
Temperatura promedio de la placa de absorción	60 °C
Temperatura del aire ambiente y del firmamento	25 °C
Velocidad del viento	1.0 m/s
Espaciamiento entre la placa absorbidora y el vidrio	2.5 cm
Angulo de inclinación del colector	45°
Altura del colector	6 cm
Espesor del aislante por el fondo y lados	2.5 cm
Conductividad térmica del aislante	0.04 W/mK

Solución

Como primer paso se calcula h_w y f con las ecuaciones (15) y (14).

Así,

$$h_w = 5.7 + 3.8(v)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8(1.0) = 9.50 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad \text{y}$$

Con estos datos podemos calcular U_i a un ángulo de 45° a partir de la ecuación (5.13)

$$f = (1 - 0.04 h_w + 0.0005 N h_w^2) (1 + 0.058 N)$$

$$U_i = \left(\frac{(344/T_p) [(T_p - T_a)/(N + f)]^{0.31} + \frac{1}{h_w}}{h_w} \right)^{-1}$$

$$f = [1 - 0.04(9.50) + 0.0005(9.50)^2 [1 + 0.058(1)]]$$

$$+ \left(\frac{\mathbf{s}(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[e_p + 0.0425N(1 - e_p)]^{f=0.70} + \frac{(2N + f - 1)}{e_c} - N} \right)$$

Ahora, según las

$$U_i = \left(\frac{1}{(344/333)[(333 - 298)/(1 + 0.70)]^{0.31} + \frac{1}{9.50}} \right)^{-1}$$

$$+ \left(\frac{(5.67 \times 10^{-8})(333 + 298)(333^2 + 298^2)}{[0.90 + 0.0425(1 - 0.90)]^{f=0.70} + \frac{(2(1) + 0.70 - 1)}{0.88} - 1} \right)$$

$$U_i = 1.74 + 3.51 = 5.25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

ecuaciones(11) y (12),

$$U_b = \frac{k_a}{l} = \frac{0.04}{0.0254} = 1.57 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

y

$$U_e = \frac{k_a M P}{l' A_c} = \frac{(0.04)(0.06)(3.80)}{(0.0254)(0.84)} = 0.43 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Finalmente, tenemos que

$$U_L = U_i + U_b + U_e = 5.25 + 1.57 + 0.43 = 7.25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Ejemplo 5.2

Estimar la eficiencia del colector del ejemplo 5.1. Suponga que la radiación solar incidente sobre el plano del colector en un instante dado es igual a 950 W/m^2 . Suponga además que la transmitancia del vidrio en el espectro solar es igual a 0.88 y que el cambio de energía interna almacenada por el colector es despreciable.

Solución

Según la ecuación (5.5),

$$(\tau\alpha) = \frac{(0.88)(0.90)}{1 - (1 - 0.90)(0.16)} = 0.80$$

Por otra parte, según la ecuación (5.6), tenemos

$$\begin{aligned} Q_u &= A_c [H_T(\tau\alpha) - U_L(T_{p,m} - T_a)] \\ &= 0.84[(950)(0.80) - (7.25)(60 - 25)] \end{aligned}$$

$$= 425.25 \text{ W}$$

Finalmente, según la ecuación (5.7)

$$h_c = \frac{Q_u}{H_T A_c} = \frac{425.25}{(950)(0.84)}(100) = 53.28\%$$

5.6 CALOR UTIL.

Con el análisis de las pérdidas de calor hecho hasta ahora, podemos calcular U_L , Q_L y por consiguiente Q_u de la ecuación (5.6). Esta manera de calcular Q_u no es muy correcta debido a que para hacerlo se supone una temperatura fija media de la placa absorbadora ($T_{p,m}$), cuando en realidad la temperatura de entrada y salida del colector son bastante diferentes. Además, la temperatura de la placa absorbadora está cambiando con el tiempo, debido a que es función de variables que también cambian constantemente con el tiempo, como temperatura ambiente y radiación solar, por mencionar algunas.

Lo que se presenta en esta parte del capítulo, es una ecuación de Q_u modificada, que nos permite calcular a éste de una manera más correcta. Esta ecuación queda en función de un factor de eficiencia global (F_3) y de la temperatura del fluido al entrar al colector (T_i). Así, la ecuación (5.6) se transforma en,

$$Q_u = A_c F_3 [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (5.17)$$

que es la ecuación más importante del presente capítulo, debido a que el factor de eficiencia global, F_3 , involucra específicamente todas las partes de la placa absorbadora, así como la temperatura del fluido y los flujos de masa pasando a través de los tubos del colector; en lugar de simplemente suponer una temperatura promedio en la placa de absorción.

Para evaluar F_3 , se hace un análisis muy detallado, pero que no expondremos en esta parte. Simplemente se mencionarán las ecuaciones más fundamentales, se identificarán todas sus variables y se dará una explicación sencilla y pertinente cuando el caso lo amerite.

Para poder evaluar F_3 , primeramente tendremos que evaluar otros dos factores de eficiencia como son el factor de eficiencia de la aleta F_1 , y el factor de eficiencia de la sección F_2 .

1. Factor de Eficiencia de la Aleta, F_1 .

Haciendo un balance de energía en una placa de absorción como la que se presenta en la figura 5.5, se encuentra que el calor por unidad de longitud que fluye por conducción a lo largo de la aleta hacia el tubo (q'_{cond}), es igual a

$$q'_{cond} = (W - D)[S - U_L(T_b - T_a)] \frac{\tanh [m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (5.18)$$

donde

$$F_1 = \frac{\tanh [m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (5.19)$$

y

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k d}} \quad (5.20)$$

donde W es el espaciamiento entre tubos, D el diámetro exterior de los tubos, T_b la temperatura de la placa en la vecindad del tubo, k la conductividad térmica de la aleta y \bar{a} el espesor de la aleta.

Como se puede observar en la ecuación (5.19), todas las variables se refieren al diseño y por lo tanto se puede calcular F_1 , para pasar luego a calcular la eficiencia de la sección.

Figura 5.5. Balance de energía en la placa de absorción o aleta. (a) Configuración y dimensiones. (b) Volumen de control

2. Factor de Eficiencia de la Sección, F_2 .

Este factor de eficiencia está relacionado con el calor útil por unidad de longitud (q'_u) que eventualmente debe ser transferido al fluido de trabajo y que es la suma del calor de conducción (ver ecuación (5.18)), más el calor por radiación solar que el tubo recibe directamente. Así,

(5.21)

donde

$$F_2 = \frac{\frac{I}{U_L}}{W \left[\frac{I}{U_L [D + (W - D) F_1]} + \frac{I}{\rho D_i h_f} \right]} \quad (5.22)$$

Aquí, T_f es la temperatura del fluido en cualquier posición, D_i es el diámetro interior del tubo y h_f el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfase tubo-fluido. Este último puede ser encontrado fácilmente en tablas, o gráficas apropiadas, conociendo el flujo y diámetro nominal de cada tubo. De esta forma, todas las variables son conocidas y por lo tanto podemos conocer el valor de F_2 .

3. Factor de Eficiencia Global del Colector, F_3 .

Haciendo un balance de energía en el propio fluido de trabajo y desarrollando una expresión que calcule la temperatura del fluido en cualquier posición del tubo en dirección del flujo, podemos encontrar, mediante un análisis no presentado aquí, que F_3 queda representada por la siguiente ecuación:

$$F_3 = \frac{mC_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F_2 A_c}{mC_p} \right) \right] \quad (5.23)$$

donde m es el flujo de masa por cada tubo y C_p la capacidad calorífica del fluido de trabajo.

De esta forma, podemos encontrar finalmente, el calor útil Q_u de la ecuación (5.17). Esta ecuación, a través de F_3 nos permite evaluar el funcionamiento de cada una de las partes de la placa absorbidora, así como las características del fluido de trabajo, de manera que tengamos oportunidad de evaluarlas y modificar cada una por separado, si es el caso.

Ejemplo 5.3

Calcular el factor de eficiencia global, F_3 , para un colector que mide 3 m de largo por 1 m de ancho, tiene sólo una cubierta de vidrio y además cuenta con las siguientes características:

La placa de absorción y tubos es de cobre.

Conductividad térmica del cobre (k) = 386.0 W/m°C

Coefficiente total de pérdidas de calor (U_L) = 6 W/m²°C

Distancia entre tubos (W) = 15 cm.

Espesor de la placa (δ) = 0.05 cm.

Diámetro exterior de los tubos (D) = 9.53 mm.

Diámetro interior de los tubos (D_i) = 8.0 mm.

Coefficiente de transferencia de calor de los tubos (h_f) = 1200 W/m²°C

Flujo de agua (m) = 0.15 kg/s.

Calor específico del agua (C_p) = 4.1868 kJ/kg°C

Temperatura del agua al entrar al tubo del colector (T_i) = 60 °C

Temperatura ambiente (T_a) = 20 °C

Trasmitancia del vidrio a la radiación solar (δ) = 0.9

Absortancia de la placa absorbidora en el espectro solar (α) = 0.9

Calcular también la eficiencia del colector (η_c), si la radiación solar incidente en un momento determinado (H_T) es igual a 1000 W/m².

Solución

Para calcular F_3 , primero calculamos F_1 y F_2 . F_1 está en función de m , que viene dada por la ecuación (5.20). Así,

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k d}} = \sqrt{\frac{6}{386(0.0005)}} = \sqrt{31.088} = 5.58 \text{ m}^{-1}$$

y por otra parte, según la ecuación (5.19)

$$F_1 = \frac{\tanh [m(W - D)/2]}{m(W - d)/2} = \frac{\tanh [5.58(0.15 - 0.00953)/2]}{5.58(0.15 - 0.00953)/2}$$

$$F_1 = \frac{\tanh (0.416)}{0.416} = \frac{0.3935}{0.416} = 0.94$$

Ahora, conociendo F_1 , podemos calcular F_2 a partir de la ecuación

(5.22). Así,

$$F_2 = \frac{\frac{1}{6.0}}{0.15 \left[\frac{1}{6.0[0.00953 + (0.15 - 0.00953)0.94]} + \frac{1}{\mathbf{p}(0.008)(1200)} \right]}$$

$$F_2 = \frac{0.166666}{0.15 \left[\frac{1}{0.849} + \frac{1}{30.16} \right]} = \frac{0.0166666}{0.15(1.1773 + 0.03316)}$$

$$F_2 = \frac{0.166666}{0.18156} = 0.918$$

Conociendo \mathbf{F}_2 , calculamos \mathbf{F}_3 a partir de la ecuación (5.23).

$$F_3 = \frac{(0.15)(4186)}{(3)(6)} \left[1 - \exp\left(-\frac{(6)(0.918)(3)}{(0.15)(4186)} \right) \right]$$

$$F_3 = 34.9[1 - \exp(-0.02632)] = 34.9(1 - 0.9740) = 0.88$$

Ahora calculamos \mathbf{Q}_n con la ecuación (5.17), pero primero tenemos que calcular el factor $(\delta\bar{a})$ a partir de la ecuación (5.5).

$$(\mathbf{ta}) = \frac{(0.9)(0.9)}{1 - (1 - 0.90)(0.16)} = 0.823$$

Así,

$$Q_u = A_c F_3 [S - U_L (T_i - T_a)] = (3)(0.88)[823 - 6(60 - 20)] = 1539.6 \text{ W}$$

De manera que la eficiencia según la ecuación (5.7), queda dada por:

$$\mathbf{h_c} = \frac{Q_u}{H_T A_c} = \frac{1539.6}{(1000)(3)}(100) = 51.31\%$$

EJERCICIOS

- 5.1 Calcule el coeficiente total de transferencia de calor, U_L , y la temperatura de la cubierta de vidrio, para un colector solar plano con una sola cubierta de vidrio que mide 3 x 1 metros y que además tiene las siguientes características:

Absortancia de la placa de absorción (pintura negra)	0.96
Emitancia del vidrio en el infrarrojo	0.88
Temperatura promedio de la placa de absorción	60 °C
Temperatura del aire ambiente y del firmamento	25 °C
Velocidad del viento	1 m/s
Espaciamiento entre la placa absorbadora y el vidrio	1.5 cm
Angulo de inclinación del colector	25.7°
Altura del colector	6 cm
Espesor del aislante por el fondo y lados	5.0 cm
Conductividad térmica del aislante	0.04 W/mK

También calcule la eficiencia del colector si la radiación solar incidente sobre el plano del mismo en un instante dado es igual a 1000 W/m². Suponga que el cambio de energía interna es despreciable y que la transmitancia del vidrio es igual a su emitancia.

- 5.2 Haciendo referencia al problema 5.1, calcule el coeficiente de transferencia de calor por la parte superior U_t , utilizando las gráficas del **apéndice B** y determine el porcentaje de error comparado con el obtenido en el problema anterior.
- 5.3 Calcule el factor de eficiencia global, F_3 , para el colector del ejemplo 5.1, que además de lo dicho anteriormente, tiene estas otras características:

La placa de absorción y tubos es de cobre.

La conductividad térmica del cobre (k) es de 386.0 W/m°C

La distancia entre tubos (W) es de 10 cm.

El espesor de la placa (δ) mide 0.05 cm.

El diámetro exterior (D) e interior (D_i) de los tubos mide 9.53 y 8.0 mm, respectivamente.

El coeficiente de transferencia de calor de los tubos (h_f) es igual a 1200 W/m²°C

El flujo de agua (m) es igual a 0.15 kg/s.

El calor específico del agua (C_p) es de 4.1868 kJ/kg°C

La temperatura del agua al entrar al tubo (T_i) es de 60 °C

La temperatura ambiente es de 25 °C

Con el valor de F_3 y la ecuación (5.17), calcule el calor útil, Q_u y la eficiencia del colector, η_c . Compare estos resultados con los obtenidos en el problema 1.

COLECTORES CONCENTRADORES

Capítulo 6

6.1 INTRODUCCIÓN.

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Como se mencionó en el capítulo anterior, esto no se puede lograr con los colectores solares planos debido a las características propias de este tipo de colectores y a que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (arriba de los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbidora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbedor, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, estos presentan varios problemas técnicos desde el punto de vista ingenieril comparados con los colectores solares planos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan únicamente la energía solar directa. Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. También las demandas de los materiales utilizados en el receptor (aislante térmico, fluido de trabajo, tubos absorbedores y cubiertas) son mayores en este tipo de colectores, debido a que es ahí donde se obtienen las altas temperaturas.

En resumen podemos decir que los problemas de operación que acabamos de mencionar, junto con los costos elevados de los materiales utilizados en este tipo de colectores focales, ha hecho que su uso no sea muy generalizado. Esto ha dado cabida a que se trabaje en los colectores concentradores fijos. Estos no tienen las desventajas de los de enfoque, aunque sólo permiten incrementos moderados de la intensidad de la radiación solar.

6.2 DIFERENTES TIPOS DE COLECTORES CONCENTRADORES.

Existe una gran variedad de colectores concentradores, pero podemos decir que todos ellos pueden clasificarse en dos categorías básicas: los de **enfoque** y los **fijos o semifijos**. Los concentradores de enfoque constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador ó sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor y un mecanismo de seguimiento para el sol. Los de enfoque necesitan forzosamente un mecanismo para seguir el sol y con ellos se pueden lograr altas temperaturas en el absorbedor. Los fijos o semifijos no necesitan del mecanismo para seguir al sol, pero sólo se pueden obtener temperaturas moderadas. Podemos tener una gran variedad de concentradores, receptores y tipos de mecanismos para seguir el sol, como se muestra enseguida.

1. Tipos de concentradores.

Los tipos de concentradores se pueden clasificar de acuerdo a diferentes tópicos. Una clasificación se refiere a si el concentrador es **reflector** o **refractor**. El primero utiliza una superficie reflejante para concentrar la radiación solar, mientras que el segundo lo hace mediante superficies apropiadas que hacen la refracción de la luz solar.

También se puede obtener una clasificación respecto a donde se afoca la luz reflejada o refractada en el concentrador solar. Los concentradores **cilíndricos o lineales**, afocan sobre una línea, mientras que los que son **superficies de revolución o circulares**, afocan sobre un punto. La figura 6.1 muestra un diagrama de estos dos tipos de concentradores. Finalmente, podemos hacer una clasificación respecto al tipo de sección que presente el concentrador. Los más comunes son de **sección parabólica, sección esférica y de sección plana**.

2. Tipos de receptores.

Existe también una gran variedad de receptores. El receptor es la parte donde la energía solar se convierte en calor. Este incluye el absorbedor y en ocasiones cubiertas y aislante. Los tipos de receptores pueden ser **cóncavos, convexos, planos, hemisféricos, cilíndricos, elípticos y concavidades**. Cada uno de estos puede ser **lineal o puntual**.

3. Tipos de seguidores de sol.

Se han desarrollado muchos mecanismos dependiendo del tipo de colector. En general podemos hablar de **mecanismos con uno o dos ejes de movimiento**. Los concentradores cilíndricos normalmente utilizan solo un eje de movimiento e incluso pueden llegar a operar estando fijos. Los circulares necesitan los dos ejes de movimiento para poder hacer un buen seguimiento del sol. También podemos hablar de **mecanismos automáticos o mecanismos manuales**. Los primeros se

utilizan para hacer un seguimiento continuo del sol y los segundos, cuando se tienen que hacer ajustes diarios, semanales o mensuales del colector concentrador.



Figura 6.1. (a) Concentrador tipo cilíndrico o lineal que afoca sobre una línea. (b) Concentrador de superficie de revolución de revolución o circular que afoca sobre un punto.

En la figura 6.2 se muestra una serie de configuraciones que pueden utilizarse tanto en colectores tipo lineal como en los tipo circular. Desde luego pueden existir más configuraciones que no son presentadas aquí.

En resumen podemos decir que con esta amplia gama de diseños, es difícil desarrollar análisis generales aplicables a todos los tipos de colectores concentradores, y por lo tanto, sólo se verán los casos más comunes. Actualmente se sigue trabajando sobre diversos diseños.

6.3 RAZÓN DE CONCENTRACIÓN.

Una manera de saber que temperaturas se pueden obtener en este tipo de colectores concentradores, es a través de la **razón de concentración, C**. Esta se define como la relación entre el área efectiva de apertura **A_a**, y el área del receptor **A_r**. El área efectiva de apertura se refiere al área proyectada no sombreada del sistema óptico. Así,

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (6.74)$$

Esta razón de concentración tiene un límite máximo que depende de si la concentración se hace en un concentrador circular como un paraboloide o en uno lineal como un concentrador cilíndrico parabólico. Así, mediante un análisis -no expuesto aquí- basado en la segunda ley de la termodinámica aplicada al intercambio radioactivo entre el sol y el receptor, obtenemos que la razón de concentración máxima para un concentrador circular o de superficie de revolución **C_{max,c}**, viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{\max,c} = \left(\frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\sin^2 \mathbf{q}_s} \quad (6.75)$$

mientras que para un concentrador lineal o cilíndrico, $C_{\max,l}$ es igual a:

$$C_{\max,l} = \left(\frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\sin \mathbf{q}_s} \quad (6.76)$$

donde \mathbf{q}_s es la mitad del ángulo subtendido por el sol y es igual a 0.27° . Así, para un concentrador circular, la razón máxima de concentración posible es de 45,000; mientras que para un concentrador lineal el máximo es sólo de 212.

Entre más alta es la temperatura a la cuál la energía necesita ser liberada, más alta debe ser la razón de concentración y también más precisos deben ser los componentes ópticos del concentrador y receptor y del mecanismo de seguimiento del sol.

Figura 6.2. Posibles configuraciones de colectores concentradores.

En la figura 6.3 se muestra un diagrama que nos relaciona los rangos prácticos de concentración que podemos obtener para diferentes tipos de sistemas ópticos, con las temperaturas obtenidas en el receptor.

6.4 CONCENTRADORES DE ENFOQUE.

Existen diversos tipos de concentradores de enfoque. En esta parte haremos un análisis de los más comunes. Para poder obtener las más altas temperaturas posibles, el concentrador debe tener la capacidad de formar una imagen nítida del disco solar en el receptor y este debe ser del tamaño mínimo que pueda contener esa misma imagen del sol.

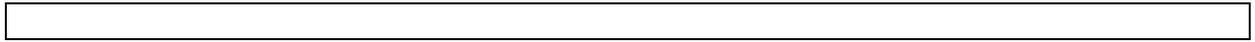


Figura 6.3. Diagrama que muestra la relación entre la razón de concentración y la temperatura de operación del receptor, para colectores concentradores con diferentes tipos de sistemas ópticos.

1. Lentes de Fresnel.

Una alta razón de concentración puede lograrse por medio de los sistemas que utilizan lentes de Fresnel. Estos pueden venir como un conjunto de lentes en una sola unidad. Cada segmento concentra mediante refracción la radiación solar incidente en un receptor posicionado centralmente como se observa en la figura 6.4. Podemos tener concentradores lineales y circulares. Los que utilizan lentes Fresnel lineales pueden colocarse en hileras, requiriendo sólo un seguimiento unidimensional del sol (ver figura 6.4.b).

En la actualidad se fabrican lentes de Fresnel en acrílico vaciado, con alta calidad óptica, aunque son deteriorados por la incidencia directa de la radiación solar.

2. Concentradores parabólicos.

Los concentradores parabólicos también pueden ser lineales o circulares. Como ya se mencionó antes, los circulares pueden tener razones de concentración máximas muy grandes (45,000), comparada con los lineales (212), y en las ecuaciones (2) y (3) viene como se determinan. En la figura 6.5 se muestra esquemáticamente un concentrador de tipo parabólico lineal con receptor elíptico, el cual permite alcanzar razones de concentración moderadas.

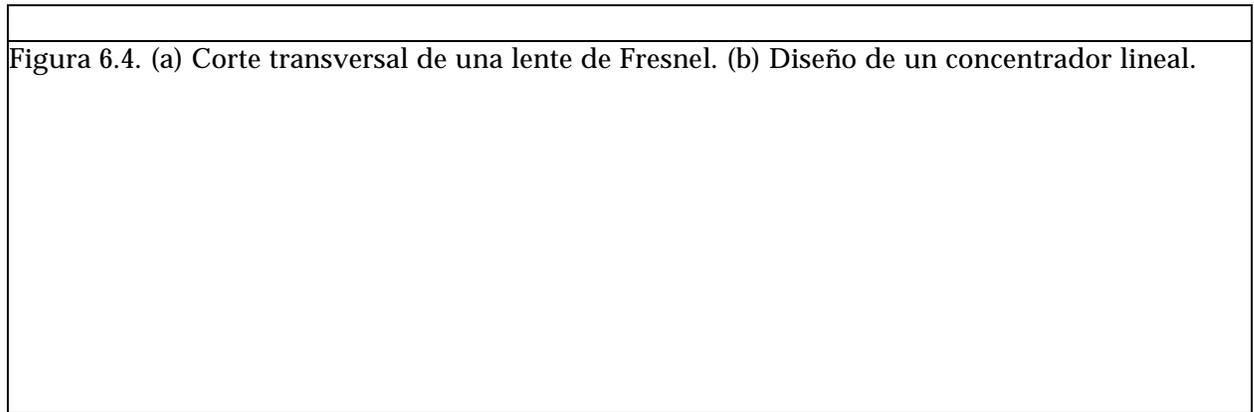


Figura 6.5. Configuración de un colector concentrador parabólico de enfoque. Disposición geométrica. b) Corte transversal del reflector parabólico con receptor elíptico.

Si hacemos un análisis detallado para encontrar la razón de concentración máxima que pudiéramos obtener del colector de la figura 6.5, tendríamos lo siguiente: Como se dijo anteriormente, el disco solar visto desde la tierra subtende un ángulo de 32' de arco, cuando se encuentra a la distancia media del sol. Por otro lado, es de suma importancia que en todos los concentradores de enfoque, el disco solar sea enfocado por el sistema óptico sobre el absorbedor. Haciendo referencia a la misma figura, el ducto de sección elíptica localizado en el foco de la parábola permite la extracción del calor útil por medio de un fluido de trabajo que generalmente son diferentes tipos de aceites dependiendo de las temperaturas que se puedan alcanzar en el absorbedor. El foco se encuentra sobre la línea **B-B'** a una distancia $a/2$ del punta **A** y al doble de la distancia del punto **B**. La mayor concentración que puede obtenerse aquí sería con un absorbedor elíptico del tamaño mínimo que pueda contener la imagen del disco solar. Se requiere un absorbedor elíptico debido a la configuración propia de este colector.

Para poder conocer la razón de concentración de este colector, primero tenemos que calcular tanto el área de apertura del colector A_a , como la del receptor A_r . Suponiendo que el colector tiene una longitud l , entonces el área de apertura del colector es igual a:

$$A_a = 2al$$

mientras que el área del receptor es igual a:

$$A_r = \frac{3}{4} pEl$$

donde E es el eje mayor de la elipse.

Así,

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2al}{\frac{3}{4} pEl}$$

y E , por trigonometría de la figura 6.5.b, es igual a:

$$E = 2a \tan(1'6)$$

Finalmente

$$C = \frac{2a}{\frac{3}{4} p 2a \tan(1'6)} = \frac{4}{3 p \tan(1'6)} = 91.7$$

Aún cuando la razón de concentración es independiente del tamaño, el valor calculado arriba no es posible conseguirlo en la práctica debido

a las inherentes pérdidas por reflexión del sistema óptico, al sombreado y posible suciedad del sistema. Con este tipo de sistemas podemos obtener temperaturas de operación del orden de los 300 °C. (Ver figura 6.3).

Aunque aquí hemos hecho el análisis de un colector parabólico lineal con un receptor elíptico. Lo mismo se puede hacer para un colector parabólico circular (paraboloide), donde los receptores no necesariamente tienen que ser elípticos.

Ejemplo 6.1

Calcule la razón de concentración de un colector concentrador lineal de sección parabólica como el de la figura 6.5, que mide 1 metro de ancho (**2a**) por 3 metros de largo (**l**). Se quiere que la imagen del disco solar se forme nítidamente en el absorbedor que en este caso es circular y además se encuentra situado a 50 cm del vértice del colector (a una distancia **a**). Haga los cálculos con el rayo reflejado en el centro de la sección parabólica y percátase que sería diferente hacerlo con el rayo reflejado en la orilla del colector.

Solución

Si queremos que la imagen del disco solar se forme nítidamente, entonces $\theta_s = 16'$. Por otro lado, el receptor se encuentra en el foco de la parábola, a una distancia **a** sobre el centro de la misma.

Mediante un análisis semejante al hecho anteriormente, tomando como referencia el rayo reflejado en el centro del colector y considerando un receptor circular podemos decir que el radio **r**, del receptor circular es igual a:

$$r = (a) \tan(16') = (4.654 * 10^{-3})(0.5) = 2.327 * 10^{-3} m$$

Ahora, con el valor de **r** podemos calcular **A_r**, como sigue:

$$A_r = 2 \pi r l = 2 \pi (2.327 * 10^{-3})(3) = 0.0438 m^2$$

Por otro lado **A_a**, sin tomar en cuenta el sombreado que hace el receptor sobre el colector, es igual a:

$$A_a = (2a)(l) = (1)(3) = 3 m^2$$

y así, la razón de concentración para este colector parabólico lineal es igual a:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{3}{0.0438} = 68.34$$

6.5 CONCENTRADORES FIJOS O SEMIFIJOS.

Es bueno considerar este tipo de colectores concentradores debido a que requieren un mínimo de seguimiento al sol e incluso pueden permanecer definitivamente en forma estacionaria. Además, tienen la capacidad de también aprovechar la radiación difusa. Las temperaturas que podemos obtener con estos dispositivos son moderadas, pero aún así son de interés debido a que un gran porcentaje del calor requerido en los procesos industriales y comerciales, requieren de temperaturas relativamente bajas. A continuación se describe un tipo de concentrador que puede estar fijo o semifijo y que presenta aspectos muy interesantes.

1. Concentrador parabólico compuesto (CPC).

Este tipo de colectores concentradores también es conocido como **colector de Winston**. En la figura 6.6 se muestra el concepto básico de concentrador parabólico compuesto, **CPC**. Este tipo de colectores concentradores pueden ser lineales o circulares, aunque son potencialmente más útiles los lineales y por lo tanto el siguiente análisis se refiere a ellos.

Analizando la figura 6.6, tenemos que cada lado del **CPC** es una parábola, donde en la parábola del lado derecho se observa el foco y su eje. Cada parábola se extiende hasta que su superficie sea paralela con el eje del **CPC**. El ángulo entre el eje del **CPC** y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con la orilla opuesta de la apertura es el **ángulo medio de aceptación**, $\tilde{\epsilon}_c$. Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entre a la apertura entre $\pm \tilde{\epsilon}_c$, será reflejado hacia el receptor ubicado en la base del concentrador (d_2) por reflexiones entre las dos secciones parabólicas.

En este tipo de colectores concentradores, la razón de concentración queda en función del ángulo de aceptación. Así,

$$C = \frac{1}{\text{sen } \mathbf{q}_c} \quad (6.4)$$

Figura 6.6. Diagrama esquemático de un concentrador parabólico compuesto.

Esta ecuación nos indica que entre más pequeño sea el ángulo de aceptación, mayor será la concentración y viceversa. Por razones de diseño propias de este tipo de colectores fijos, los ángulos de aceptación en la práctica deben ser amplios. A medida que el ángulo de aceptación se va haciendo pequeño, se hace necesario darle orientación al **CPC**, además de que la altura que debería tener es demasiado grande y por lo tanto impráctica. Por otro lado, el que el ángulo de aceptación sea grande, ofrece tres ventajas muy importantes:

1. Permite la operación del concentrador por períodos de tiempo extensos sin necesidad de ajustar su orientación.
2. Permite el empleo de superficies reflejantes no muy precisas.
3. Permite la captación y concentración de una porción de la radiación difusa.

En la figura 6.7 se muestra una gráfica de donde podemos obtener el número de veces que un **CPC** debe orientarse de acuerdo con la razón de concentración y por lo tanto del ángulo de aceptación. Por ejemplo, si el ángulo de aceptación es de 90° , **C** es igual a la unidad y vemos que el colector debe tener una sola posición a lo largo de todo el año, o sea, nos estamos refiriendo a los colectores planos. Por otro lado, si el ϵ_c es muy pequeño (1° o menos), la razón de concentración anda entre 50 y 100, pero resulta que este colector ocuparía movimiento continuo durante todo el día, además de que como ya lo mencionamos, tendría una altura muy grande y prácticamente no se podría construir. Esta altura (h_c) la podemos determinar mediante la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{d_2}{2} (C + 1) (C^2 - 1)^{1/2} = \frac{d_2}{2} (C + 1) (\text{Cot } \mathbf{q}_c) \quad (6.5)$$

Según Rabl, la altura del **CPC** puede reducirse a la mitad del valor dictado por la ecuación anterior, sin afectar notablemente el funcionamiento del colector. Esto es importante debido a que reduce el uso de materiales y por lo tanto el costo del **CPC**, además de que justamente en la región truncada es donde ocurre el mayor número de reflexiones de la radiación, y al eliminarla, se reduce considerablemente el número de reflexiones de la radiación solar incidente en el colector.

Figura 6.7. Razón de concentración como función del ángulo de aceptación y del número de posiciones que debe tener un CPC.

Ejemplo 6.2

Calcular la razón de concentración **C** y la altura que debe tener un colector parabólico compuesto **h_c**, que tiene un ángulo de aceptación **ε_c** de 2° y un ancho de absorbedor **d₂** igual a 2.5 cm.

Solución

Según la ecuación (6.4), la razón de concentración es igual a:

$$C = \frac{1}{\sin \mathbf{q}_c} = \frac{1}{\sin(2)} = 28.6$$

Conociendo **C**, podemos obtener **h_c** mediante la ecuación (6.5). Así,

$$h_c = \frac{d_2}{2}(C + 1)(\cot \alpha_c) = \frac{2.5}{2}(28.6 + 1)\cot(2) = 1061\text{cm} = 10.61\text{m}$$

Como podemos observar, esta altura es demasiado grande y resulta verdaderamente impráctico hacer un colector **CPC** con esta características, aún cuando el colector fuera truncado con la mitad de esa altura (5 metros).

EJERCICIOS

6.1 (a) Calcular la razón de concentración máxima (C_{\max}), para un colector concentrador circular parabólico (paraboloide o superficie de revolución, ver figura) que tiene un diámetro de apertura total ($2a$) igual a 2 metros, y donde el receptor es un esferoide alargado (elipse rolada en su eje mayor, forma de huevo) que se encuentra en el foco de la parábola, con un área igual:

$$A_r = \frac{2pE^2e}{\sqrt{E^2 - e^2}} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{E^2 - e^2}}{E} \right) + 2pe^2$$

donde E es el semieje mayor del esferoide, e el semieje menor y $\operatorname{sen}^{-1}(x)$ se calcula en radianes. Considere $2\tilde{\alpha}_s = 32'$.

(b) Estime también la temperatura que se puede alcanzar en este colector concentrador parabólico.

6.2 (a) Calcular la altura de un concentrador parabólico compuesto (h_c) en el que el ancho del absorbedor (d_2) mide 2.5 cm y el ángulo de aceptación ($\tilde{\alpha}_c$) es igual a 6° .

(b) Estime lo mismo, si $d_2 = 5$ cm.

(c) Cuáles serían las alturas si se tratara de un **CPC** truncado.

ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

Capítulo 7

7.1 INTRODUCCION.

La energía solar es intermitente por naturaleza debido a los movimientos de rotación y traslación de la tierra y también debido a las condiciones meteorológicas de cada lugar (nubes). Además, es una fuente de energía dependiente del tiempo y en muchas ocasiones no coincide la necesidad con la disponibilidad. Generalmente la energía se requiere más, precisamente cuando no hay radiación solar (noche). Esto hace necesario que prácticamente todos los procesos de conversión fototérmica requieran de un sistema de almacenamiento de energía, para poder satisfacer las demandas de energía en el momento que sean requeridas. En ocasiones, ni contando con sistemas de almacenamiento se pueden satisfacer todas las demandas, por lo que se hace necesario considerar además una fuente auxiliar de energía. En la figura 7.1 se muestra una gráfica típica de un proceso solar con almacenamiento de energía y que es dependiente del tiempo. H_T es la energía solar incidente, Q_u es el calor útil ganado por el colector y L son las cargas. Las áreas de sombreado vertical muestran el tiempo en que hay exceso de energía después de satisfacer la carga y puede ser adicionada al sistema de almacenamiento. Las áreas de sombreado horizontal muestran la energía sacada del almacenamiento para satisfacer las demandas en tiempo donde no hay radiación incidente. Las áreas punteadas muestran la energía suministrada a la carga directamente del colector, cuando este se encuentra en funcionamiento.



Figura 7.1 Proceso solar como función del tiempo para un período de tres días, y que utiliza un sistema de almacenamiento.

En el presente capítulo se describirán en forma general los distintos sistemas de almacenamiento y los principios básicos en los cuales se basan. Hablaremos de almacenamiento de energía por calor sensible, por cambio de fase, por reacciones químicas y mediante estanques solares. También se abordará el tema sobre sistemas de almacenamiento pasivo y activo.

7.2 SISTEMAS PASIVOS.

Los sistemas pasivos se usan generalmente en el acondicionamiento calorífico de edificios y tanto lo que sirve de colector como el sistema de almacenamiento se encuentran incorporados en los distintos componentes de mismo edificio, como: pisos, paredes, recipientes con agua y techos. El tipo de almacenamiento de energía utilizado en estos sistemas es generalmente por calor sensible (cambios de temperatura de los distintos componentes del edificio), que explicaremos más adelante. Debido a que en estos sistemas las temperaturas de almacenamiento son bajas, usualmente menores de 40 °C, se requiere de grandes volúmenes del material que sirve como almacén. Por ejemplo, los distintos componentes de un edificio que representan un gran volumen, pueden absorber energía durante las horas de sol y posteriormente cederla durante la tarde o noche. Para poder calcular la capacidad de almacenamiento de un material determinado, necesitamos conocer sus propiedades como la densidad y el calor específico. En la tabla 7.1 se muestran estas propiedades para algunos de los materiales más utilizados en la construcción de edificios.

Tabla 7.1 Densidad y calor específico de algunos de los materiales más usados en la construcción.		
MATERIAL	DENSIDAD kg/m ³	CALOR ESPECIFICO KJ/Kg°C
Agua	1000	4.186
Acero	7853	0.500
Roca o piedra	2724	0.880
Concreto	2244	0.960
Ladrillo	2244	0.840
Arena	1522	0.800
Pino o abeto	433	2.800
Arcilla	1010	0.920

Utilizando los datos de la tabla anterior, y sabiendo que la densidad ρ , y el calor sensible Q_s , viene dados respectivamente por las siguientes ecuaciones,

$$Q_s = \frac{m C_p \Delta T}{V} \quad (7.92)$$

podemos encontrar que una superficie de concreto de 120 m² y 15 cm de espesor (volumen = 18 m³) que incrementa su temperatura en 5 °C durante las horas de sol, puede almacenar aproximadamente 194 MJ de energía que podrían ser suficientes para suministrar toda la carga térmica de una casa habitación bien aislada térmicamente. En las ecuaciones anteriores m es la masa, V el volumen, C_p el calor específico y ΔT el cambio de temperatura, del material utilizado.

Aunque el agua no es precisamente un elemento estructural de un edificio, puede emplearse para almacenar energía en el mismo. La ventaja del agua sobre el concreto o ladrillo es que tiene una gran capacidad calorífica como se ve en la tabla 7.1, y por lo tanto tiene más capacidad de almacenamiento por unidad de volumen, que los materiales mencionados.

En la figura 7.2.a se muestran un sistema pasivo para el suministro de calefacción a la vivienda. El sistema trabaja en dos etapas: durante el día almacena calor y lo cede por la tarde o noche.

7.3 SISTEMAS ACTIVOS.

La característica principal de los sistemas activos es que estos utilizan un fluido de trabajo en movimiento que puede ser agua, aire, aceites o algún otro fluido. Los principales componentes que intervienen en estos sistemas son: el colector solar, la unidad de almacenamiento, sistemas de conversión y control y el lugar donde se hace la descarga de energía.

Generalmente, el medio de almacenamiento es agua si por el colector se hace circular un líquido. Similarmente, si en el colector circula aire, el medio de almacenamiento serán rocas o piedras. Las temperaturas alcanzadas en este tipo de sistemas andan entre los 50 y 100 °C. En este caso el almacenamiento de energía se puede dar por cualquiera de los mecanismos antes mencionados (calor sensible, cambio de fase, reacciones químicas y estanques solares) y a continuación se presenta un análisis un poco más detallado de cada uno de ellos.

En la figura 7.2.b se muestran un sistema activo para el suministro de calefacción a la vivienda. También este trabaja en dos etapas al igual que en el caso anterior: durante el día almacena calor y lo cede por la tarde o noche.

7.4 ALMACENAMIENTO POR CALOR SENSIBLE O CAPACIDAD CALORIFICA.

Diversos tipos de materiales líquidos, sólidos y combinaciones de líquidos y sólidos, pueden almacenar energía por cambios de temperatura. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna (ΔU) que sufre el material al cambiar su temperatura y viene a ser igual al calor sensible (Q_s) que se vio anteriormente y que se representa por la ecuación (7.2). Así:

$$\Delta U = Q_s = m C_p \Delta T \quad (7.93)$$

Según la ecuación (7.3), la capacidad de almacenamiento depende específicamente de las capacidades caloríficas (mC_p) de los materiales utilizados y de los cambios de temperatura que en ellos se den. Esta ecuación también puede quedar en función de la **capacidad volumétrica térmica**, C_v , de manera que:

$$Q_s = \Delta U = V C_v \Delta T \quad (7.94)$$

donde

$$C_v = r C_p \quad (7.95)$$

y V el volumen del material utilizado.

Figura 7.2. a) Sistemas solares pasivos. b) Sistemas solares activos. Ambos para el acondicionamiento calorífico de viviendas.

En la tabla 7.1 se proporciona información sobre algunas sustancias y materiales que pueden utilizarse como medios de almacenamiento, aunque en este caso concreto, sólo analizaremos los medios más comunes como son el agua y las rocas o piedras.

Una regla de tipo práctico para determinar si un material es apropiado para utilizarse como medio de almacenamiento, es que este debe ser capaz de almacenar entre 300 y 600 kJ/°C-m² de área

de colector, como mínimo.

También encontramos que cuanto mayor sea la temperatura que pueda alcanzar el medio de almacenamiento, tanto menor será el tamaño del sistema, aunque las pérdidas se hacen más evidentes. Por ejemplo, 1000 litros de agua pueden almacenar aproximadamente 84 MJ de energía cuando su temperatura aumenta de 30 a 50 °C y 168 MJ cuando la temperatura varía de 30 a 70 °C. Nótese que se requieren aproximadamente 2.5 m³ de rocas para almacenar la misma cantidad de energía con los mismos incrementos de temperatura.

1. Almacenamiento en agua.

El agua es el medio ideal de almacenamiento para sistemas activos y pasivos, debido a que tiene una gran capacidad calorífica y por lo tanto mayor capacidad de almacenamiento. Analizando los datos de la tabla 7.1 se desprende que el agua puede almacenar casi cinco veces más energía (4.186 kJ/kg-°C) que la que puede almacenar la misma masa de roca o piedra (0.88 kJ/kg-°C). Además, el medio de transporte de energía, hacia o de la unidad de almacenamiento, se hace a través de la misma agua. Esta también puede utilizarse en forma directa o mediante el uso de cambiadores de calor y de manera continua a lo largo del día.

Algunas desventajas que se tienen al utilizar el agua como medio de almacenamiento, es que se necesitan depósitos que generalmente son grandes y caros, se oxidan si son de metal y hay grandes pérdidas de calor por conducción y convección que tienen que ser evitadas utilizando aislantes. Otro aspecto es que la energía es liberada a diferentes temperaturas.

Una de las aplicaciones más comunes se da en los calentadores solares de agua para uso doméstico. En la figura 7.3, se muestran dos sistemas activos de este tipo donde se puede apreciar el tanque de almacenamiento.

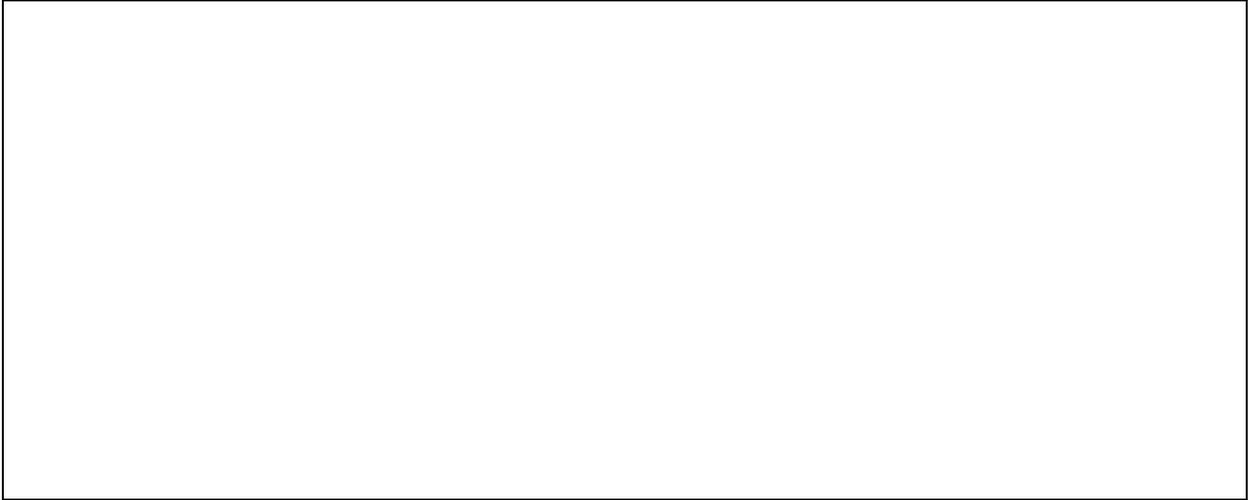


Figura 7.3 Calentador solar de agua como medio de almacenamiento térmico. (a) Sistema directo. (b) Sistema con intercambiador de calor.

Considerando que la capacidad de almacenamiento del agua sea de $300 \text{ kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$ de área de colección, y conociendo su capacidad volumétrica térmica ($C_v = 4186 \text{ kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^3$), podemos encontrar cuál debe ser el volumen del tanque de almacenamiento por m^2 de área de colección, al dividir la capacidad de almacenamiento entre la capacidad volumétrica térmica ($300 \text{ kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2 / 4186 \text{ kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^3$ área colector), de manera que el volumen del tanque almacén (V) es igual a $0.075 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de área de colector.

Una manera de conocer los cambios de temperatura dentro de un tanque de almacenamiento que tiene diferentes entradas y salidas de energía, se hace mediante un balance de energía del mismo, que se representa por la siguiente ecuación:

$$Q_s = m C_p \frac{dT_n}{dt} = Q_u - L - (U A)(T_n - T_a) \quad (7.96)$$

donde dT_n/dt es el cambio de temperatura con respecto al tiempo, Q_u el calor útil ganado por el colector, L la carga o demanda de energía, U el coeficiente total de pérdidas de calor, A el área del tanque almacén, T_n la temperatura al inicio de un determinado intervalo de tiempo y T_a la temperatura ambiente.

Como la ecuación anterior es función del tiempo, se puede resolver por diferencias finitas después de transcurrido un intervalo de tiempo Δt . Así, conociendo la temperatura inicial T_n , encontramos que la temperatura al final del intervalo de tiempo T_{n+1} es igual a:

$$T_{n+1} = T_n + \frac{\Delta t}{mC_p} [Q_u - L - U A(T_n - T_a)] \quad (7.97)$$

Ejemplo 7.1

Encontrar la energía almacenada en un tanque que contiene 150 litros de agua que incrementan su temperatura de 40 a 60 °C.

Solución

Según la ecuación (7.3), tenemos que la energía almacenado por calor sensible (Q_s) y que es también igual al cambio de energía interna (ΔU) del agua, es igual a:

$$\Delta U = Q_s = m C_p \Delta T = (150)(4.186)(60 - 40) = 12,558kJ = 12.558MJ$$

2. Almacenamiento en piedras o rocas.

Las rocas o piedras también son un buen medio de almacenamiento. En sistemas activos, generalmente se usa lechos de piedra bajo tierra o lechos empaquetados (ver figura 7.2.b). Como ya se había mencionado, el aire es el fluido de trabajo que remueve o adiciona el calor de la unidad de almacenamiento. En este caso, el calor por lo general no puede ser adicionado y removido al mismo tiempo.

Aunque las rocas o piedras no tienen un calor específico alto, son buenos como medio de almacenamiento debido a que tienen una gran densidad, son de bajo costo, tienen conductividad térmica baja y no tienen problemas de corrosión.

Ejemplo 7.2

Calcular el volumen necesario por m^2 de área de colección de: (a) piedra o roca y (b) agua. Suponga que estos dos materiales tienen una capacidad de almacenamiento térmico (**CAT**) igual a $600 \text{ kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$ de área de colección.

Solución.

Primero calculamos la capacidad volumétrica térmica de los materiales mediante la ecuación (7.5) y ayudados de los datos de la tabla 7.1

$$(a) C_{v,Roca} = rC_p = (2724)(0.88) = 2397.12 \frac{kJ}{m^3 \text{ } ^\circ C}$$

$$(b) C_{v,Agua} = rC_p = (1000)(4.186) = 4186 \frac{kJ}{m^3 \text{ } ^\circ C}$$

Después, la capacidad de almacenamiento se divide entre las capacidades volumétricas encontradas y se obtiene el volumen de cada material. Así:

$$(a) V_R = \frac{CAT}{C_{v,Roca}} = \frac{600}{2397.12} = 0.250 \frac{m^3}{m^2 \text{ de colector}}$$

$$(b) V_A = \frac{CAT}{C_{v,Agua}} = \frac{600}{4186.00} = 0.143 \frac{m^3}{m^2 \text{ de colector}}$$

7.5 ALMACENAMIENTO POR CALOR LATENTE O CAMBIO DE FASE.

La energía que una sustancia necesita para cambiar de fase, generalmente es mayor que la que se ocupa para tener incrementos de temperatura pequeños en la misma sustancia. Esto da la pauta para pensar que se puede aprovechar el cambio de fase de algunas sustancias para utilizarlas como medios de almacenamiento de energía solar. La idea es que la sustancia absorba la energía solar de forma directa (sistema pasivo) o mediante un colector solar (sistema activo) y cambie de fase. Al cambiar de fase la sustancia conserva en forma **latente** la energía absorbida. Esta será cedida posteriormente, cuando la sustancia regrese a su estado original.

Los cambios de fase pueden ser **sólido** \leftrightarrow **líquido**, **líquido** \leftrightarrow **vapor** y **sólido** \leftrightarrow **sólido**. El cambio de fase líquido \leftrightarrow vapor casi no se utiliza debido a que el vapor genera grandes presiones y en muchos casos no resulta práctico trabajar con este tipo de sistemas debido a que este tiene que ser diseñado para soportar presiones altas y por lo tanto se hace más complicado y costoso. Por esta razón, lo que más se aprovecha son los cambios de fase líquido \leftrightarrow sólido y sólido \leftrightarrow sólido, aunque en esta parte sólo hablaremos del cambio de fase sólido \leftrightarrow líquido.

Las sustancias que pueden utilizarse como medios de almacenamiento por cambio de fase sólido->líquido pueden ser muy variadas (hielo, sustancias orgánicas, sales hidratadas, compuestos inorgánicos y metales o aleaciones). Algunas tienen puntos de fusión altos por lo que se haría necesario utilizar colectores concentradores para poder obtener altas temperaturas y provocar el cambio de fase en la sustancia.

En la tabla 7.2 se presenta una lista de sustancias (sales hidratadas) que tiene un alto calor de solidificación->fusión, bajo costo y donde la temperatura para provocar el cambio de fase puede ser alcanzada fácilmente mediante colectores planos que utilizan la energía solar. La tabla muestra la temperatura de fusión, la entalpía de fusión y la densidad.

El tener más capacidad de almacenamiento en las sustancias, reduce el tamaño de los sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, el agua líquida tiene un calor específico igual a 4.186 kJ/kg-°C y su calor de solidificación o fusión es igual a 334.24 kJ/kg. En consecuencia el agua puede almacenar aproximadamente 80 veces más energía al cambiar de fase, que como líquido al cambiar su temperatura en 1°C. Otra ventaja de estos sistemas es que liberan la energía a una temperatura casi constante.

Tabla 7.2 Datos de algunas sales hidratadas que se utilizan como medios de almacenamiento de la energía solar.			
Sal	Punto de fusión	Entalpía de fusión, KJ/Kg	Densidad, Kg/m3
CaCl ₂ .6H ₂ O	29.39	174	1 637
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	32.36	246	1 445
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	36	265	1 830
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	39-42	139	1 557
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	31-32	251	1 557
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48-49	209	1 667

Algunos de los problemas que presentan este tipo de sales son los que mencionamos a continuación:

1. En algunos casos la sal presenta un sobreenfriamiento o falla de la sal para solidificarse en la temperatura respectiva.
2. Segregación de los componentes de la mezcla por efecto de la gravedad mientras se encuentra en fase líquida.

3. Degradación de la sal después de varios ciclos de uso.
4. Falla de los recipiente que contienen las sales debido a que estas son corrosivas.
5. Area de contacto grandes entre la sustancia y el fluido de trabajo que transporta la energía de y hacia el tanque almacén, en caso de sistemas activos.

Algunos de estos problemas han sido resueltos parcialmente. Por ejemplo, la adición de borax (tetraaborato de sodio decahidratado) a la sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) elimina el sobreenfriamiento provocando la cristalización entre los 28 y 29 °C, con su consecuente liberación de energía. Por otro lado, existen ciertos agentes químicos que resuelven el problema de la segregación o separación de la sustancia. Estos agentes, forman una especie de matriz microscópica que mantiene a los componentes en suspensión. Finalmente, el problema de la corrosión en los tanques de almacenamiento se resuelve parcialmente mediante el uso de tanques hechos de diversos plásticos.

El uso principal de este tipo de sistemas, que pueden ser pasivos o activos, es en el acondicionamiento calorífico de edificios y viviendas y en diversos procesos industriales. La figura 7.4 muestra un recipiente con una sal utilizado como almacén de energía y que tiene una gran área de contacto para asegurar una buena transferencia del calor.

Para calcular el calor latente (Q_l) que una sustancia puede almacenar al cambiar de fase , utilizamos la siguiente ecuación:

$$Q_l = l_{fus} m \quad (7.8)$$

donde \bar{e}_{fus} es el calor latente de fusión o entalpia de fusión y m la masa de la sustancia que cambia de fase.

Esta ecuación también puede quedar en función de la capacidad volumétrica térmica (C_v). En este caso ésta es igual a:

$$C_v = r l_{fus} \quad (7.9)$$

y por lo tanto:

$$Q_l = V C_v \quad (7.10)$$

donde V es el volumen de la sustancia que cambia de fase.

Figura 7.4. Tanque almacén de calor para una sal hidratada.

Ejemplo 7.3

¿Cuanto calor almacenan 200 kg de sulfato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) al cambiar de fase sólida a líquida mediante la utilización de la energía solar? ¿Cuál debe ser el tamaño del recipiente almacén de energía?

Solución

Para calcular el calor almacenado, utilizamos la ecuación (7.8) y los datos de la tabla 7.2. Así,

$$Q_l = I_{fus} m = (251)(200) = 50200 \text{ kJ} = 50.2 \text{ MJ}$$

El volumen del tanque almacén se puede calcular utilizando la ecuación (7.10) siempre y cuando se calcule primero la capacidad volumétrica. Así,

$$C_v = \mathbf{r} \mathbf{I}_{fus} = (1557)(251) = 390807 \frac{kJ}{m^3}$$

$$V = \frac{Q_i}{C_v} = \frac{50200}{390807} = 0.128 m^3 = 128 \text{ litros}$$

También se puede calcular utilizando la ecuación (7.1) sobre la densidad.

$$V = \frac{m}{\mathbf{r}} = \frac{200}{1557} = 0.128 m^3 = 128 \text{ litros}$$

7.6 ALMACENAMIENTO EN ESTANQUES SOLARES.

Un estanque común con agua es capaz de captar una gran cantidad de energía solar a través de todos los días del año. Sin embargo, la temperatura del agua permanece baja debido a que también hay grandes pérdidas de energía por radiación, convección y evaporación principalmente. Una manera de evitar esas pérdidas de calor es mediante el uso de estanques con agua salada. Debido al aumento en la densidad del agua por efecto de las sales disueltas, no se da el efecto de la convección dentro del estanque y además esto permite que se desarrolle un gradiente de temperatura estable y positivo hacia abajo. De esta forma, la temperatura del fondo es mayor que la que se tiene en la superficie y por lo tanto se evita la mayor parte de las pérdidas de calor que se dan en la superficie del líquido.

Otros aspectos que ayudan a que esto suceda, es que el agua -con sales o sin sales disueltas- no es buena conductora térmica y además es opaca a la radiación infrarroja. También, permite que la fracción visible y ultravioleta de la radiación solar penetre hasta el fondo del estanque y ahí se quede almacenada. La captación de energía solar se puede mejorar si el fondo y paredes están pintadas de negro. La remoción del calor se hace mediante intercambiadores de calor apropiados, para evitar que la solución tenga movimiento y por lo tanto se pierda el gradiente de temperatura positivo. Otro factor que puede contribuir a que se pierda dicho gradiente es el viento que pega en la superficie del líquido. Esto se puede evitar colocando una cubierta transparente adecuada sobre el estanque solar.

La absorción de la radiación de longitud de onda larga debe tomarse en cuenta debido a que el 27% de la radiación en el espectro solar total es absorbida en el primer centímetro de la salmuera. La eficiencia de aprovechamiento, en consecuencia, está limitada a la absorción en la capa con gradientes. Puede demostrarse que la fracción de luz que resta después de atravesar una distancia x de agua clara es

$$f(x) = a - b \ln(x) \quad 1 < x < 1000 \text{ cm} \quad (7.11)$$

donde $a = 0.73$ y $b = 0.08$. La profundidad x se expresa en centímetros.

Podemos decir que en un estanque solar con salmuera se distinguen tres regiones distintas, aunque difusas: Una capa de agua pura en la superficie, una intermedia donde ocurren los gradientes de densidad y una convectiva en el fondo. Esta última es lo que constituye en realidad el sistema de almacenamiento de energía, dado que tiene las mayores temperatura y se encuentra aislada de la atmósfera por las capas superiores.

7.7 REACCIONES QUIMICAS.

La energía solar también puede almacenarse por medio de reacciones químicas. Estas deben ser reacciones endotérmicas reversibles, que se invierten cuando se requiere que la energía sea liberada. Para que una reacción sea utilizada en el almacenamiento de la energía solar, se requiere que:

1. La reacción sea reversible.
2. Los reactivos puedan hacer uso de la energía del espectro solar, tanto como sea posible.
3. La energía almacenada en la reacción sea grande. Al menos del orden de 600 W-h/kg.
4. Que los reactivos sean económicos.

En caso de que los productos de la reacción puedan separarse y usarse como combustibles, no se necesita que la reacción sea reversible. Un ejemplo típico es la producción de hidrógeno. Este puede ser obtenido mediante al menos 4 procesos donde se puede utilizar la energía solar: proceso térmico directo, termoquímico, electrolítico y fotolítico.

El primero de ellos necesita de temperaturas muy altas (3000 °C) para descomponer el agua en sus elementos hidrógeno y oxígeno, y por lo tanto se haría necesario el uso de colectores concentradores.

En el segundo proceso se llevan a cabo una serie de reacciones químicas de diversas sustancias, generalmente también a temperaturas altas (700 - 800 °C), para finalmente obtener el hidrógeno.

Si la energía solar primero se convierte en energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos, el agua puede ser electrolizada para producir hidrógeno. En las reacciones fotolíticas, los fotones de la radiación solar pueden ser absorbidos por el agua y cuando la energía absorbida alcanza un cierto nivel, (285.9 kJ/mol de agua), se libera el hidrógeno.

La energía solar también puede emplearse en los procesos de fermentación anaeróbica de algas para la producción de metano (CH_4). Este es estable a temperatura ambiente y al reaccionar con el oxígeno mediante una combustión, libera la energía almacenada para producir altas temperaturas.

EJERCICIOS

- 7.1 Calcula la cantidad de energía que pueden almacenar (a) 3000 litros de agua, (b) 3 m³ de concreto y (c) 3 m³ de roca o piedra, cuando la temperatura cambia de 85 a 95 °C.
- 7.2 Un sistema activo de calefacción en una casa habitación tiene 42 m² de colectores planos. Estime el tamaño del tanque de almacenamiento. Suponga rocas con una capacidad de almacenamiento de 600 kJ/°C-m² de área de colector.
- 7.3 Considere un estanque con agua pura. Estime la profundidad (x) a la que ya se ha absorbido el 50% de la luz incidente.

COLECTORES FOTOVOLTAICOS

Capítulo 8

8.1 INTRODUCCION.

Las principales aplicaciones de la energía solar son de tipo térmico, donde la energía luminosa, mediante diversos mecanismos se aprovecha en forma de calor. Sin embargo, existe una aplicación no fototérmica de mucha importancia que consiste en la producción de electricidad a partir de la radiación solar mediante celdas solares y paneles fotovoltaicos.

La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente de energía primaria y, en consecuencia, sólo podemos disponer de ella obteniéndola por transformación de alguna otra forma de energía. Una de las primeras formas como el hombre obtuvo energía eléctrica fue mediante el uso de pilas que generaban electricidad a partir de reacciones químicas. Posteriormente, la energía mecánica fue la principal fuente de electricidad gracias a la utilización de dínamos y alternadores. En la actualidad, la principal manera de obtener la electricidad es mediante el uso de grandes centrales termoeléctricas, en las que la energía térmica liberada por una fuente de energía primaria (madera, carbón, petróleo, gas, combustible nuclear, etc.) se transforma en electricidad a través de un proceso que exige el uso de turbinas y alternadores, los cuales cubren la etapa final de conversión de energía mecánica en eléctrica. También las centrales hidroeléctricas son de importancia en la actualidad y conceptualmente trabajan bajo el mismo principio al utilizar la energía potencial de una caída de agua para obtener energía mecánica que posteriormente será transformada en eléctrica.

Recientemente, el hombre ha aprendido a obtener electricidad a partir de la energía solar mediante procesos fototérmicos y fotovoltaicos. Los primeros operan bajo principios semejantes a los de las centrales térmicas convencionales. Los denominados fotovoltaicos, presentan una importante simplificación respecto a los procesos energéticos convencionales, debido a que transforman una energía primaria, la solar, en electricidad de un modo **directo**, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía. De lo anterior, podemos entonces decir que las **células solares** o **celdas fotovoltaicas** son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en electricidad, de un modo directo. Estos dispositivos son estáticos y en absoluto semejantes a las generadores convencionales.

El capítulo está dedicado a este tipo de dispositivos y se describen los principios bajo los cuales funcionan, la tecnología de su fabricación, las formas como se utilizan a través de paneles fotovoltaicos y sus principales aplicaciones.

8.2 PRINCIPIOS DE OPERACION Y CARACTERISTICAS.

1. Efecto fotovoltaico.

Existen ciertos materiales que al absorber un determinado tipo de radiación electromagnética generan en su interior pares de cargas positivas y negativas. Si la radiación electromagnética es la solar y el material es un semiconductor tal como el silicio, **Si**, los **pares de carga** son **electrones** (e^-) y **huecos** (h^+) que una vez producidos se mueven aleatoriamente en el volumen del sólido. Si no hay ningún condicionante externo ni interno, las cargas de signos opuestos se recombinan neutralizándose mutuamente. Por el contrario, si mediante algún procedimiento se crea en el interior del material un campo eléctrico permanente, las cargas positivas y negativas serán separadas por él. Esta separación conduce al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos zonas del material que, si son conectadas entre sí mediante un circuito externo al mismo tiempo que la radiación electromagnética incide sobre el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo. Este fenómeno se conoce como **efecto fotovoltaico** y es el fundamento en el que se basan las celdas fotovoltaicas. En la figura 8.1 se esquematiza el mecanismo descrito.

El campo eléctrico interno local se crea siempre que se ponen en contacto un semiconductor tipo **n** con otro tipo **p**, es decir, donde existe una **unión p-n**. En la práctica dicha unión se logra mediante diferentes procedimientos, aunque los más convencionales son las técnicas de difusión de impurezas dentro del material.



Figura 8.1. Descripción gráfica y cualitativa del efecto de la radiación solar en el volumen de un semiconductor y del mecanismo de operación de la celda fotovoltaica.

2. La celda fotovoltaica.

La descripción de la celda fotovoltaica se basa en las de **Si monocristalino**, aunque lo que se expone es válido para todos los tipos de fotoceldas. Partiendo de una **oblea** de **Si** (disco muy delgado) se produce una célula solar una vez que se ha creado el campo eléctrico interno ya citado y después de preparar los contactos eléctricos adecuados. El campo eléctrico debe ser superficial para que la radiación solar llegue fácilmente hasta él, de manera que la unión rectificadora se pone muy próxima a la cara que enfrenta el sol. Por otro lado, los contactos eléctricos que se hacen en ambas caras de la oblea son de geometría y características especiales. La cara que no recibe la radiación se recubre totalmente, mientras que la cara expuesta a los rayos solares sólo se cubre parcialmente mediante un electrodo metálico en forma de red. (Ver figura 8.2.a). Esto permite que el electrodo recoja en forma eficiente los portadores de carga eléctrica generados en el interior de la oblea, además de permitir que los rayos solares alcancen un porcentaje alto del área del material semiconductor. (Ver figura 8.2.b).

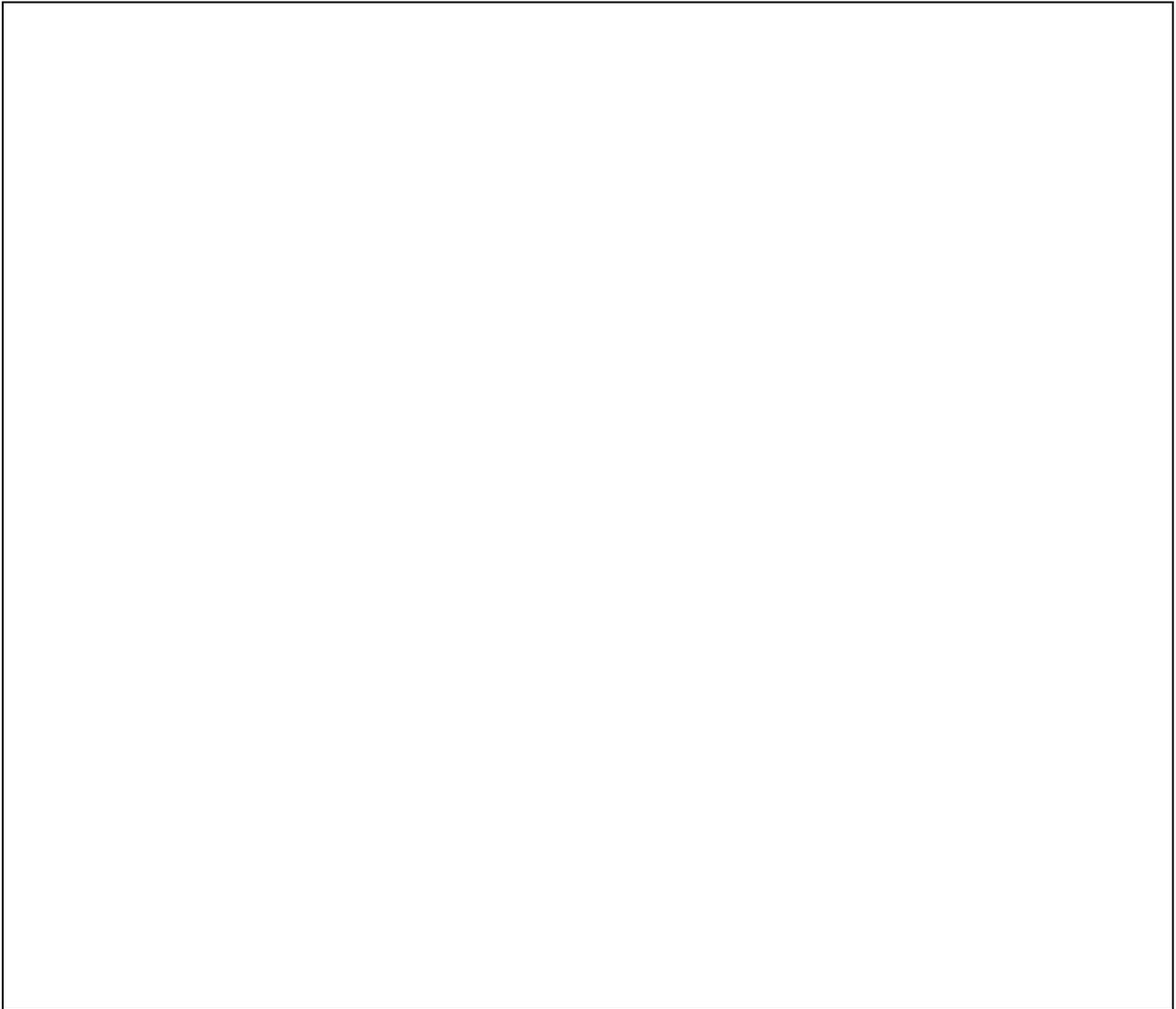


Figura 8.2 a) Representación esquemática del funcionamiento de una célula solar bajo la acción de la luz solar. b) Representación aproximada de la estructura exterior de una célula solar convencional de Si monocristalino

En resumen, para que una célula solar expuesta al sol produzca energía eléctrica debe reunir las siguientes tres características fundamentales:

- a) Ser capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar para que la generación de pares electrón-hueco sea eficiente.

- b) Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas impidiendo su posterior recombinación.
- c) Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

Aunque en la práctica las células solares de mayor utilización son las de Si monocristalino, desde 1954 a la fecha se han ensayado y desarrollado una gran variedad de nuevos tipos, modelos y conceptos de células solares. Estas se pueden fabricar de diferentes geometrías según las necesidades.

3. Respuesta espectral de la célula de silicio.

El espectro solar está compuesto por radiación de diferente longitud de onda λ , como se observa en la figura 8.3.



Figura 8.3. Espectro de la radiación solar fuera y dentro de la atmósfera terrestre.

La energía de los fotones, $h\nu$, depende de la longitud de onda y se mide convencionalmente en electrón-voltio (eV). La relación que existe entre la longitud de onda λ y la energía de los fotones viene dada por la siguiente ecuación:

$$h\nu(eV) = \frac{1.2406}{\lambda(\mu m)} \quad (8.108)$$

Por otro lado, la energía necesaria para crear un par electrón-hueco en el silicio es de 1.12 eV aproximadamente, que corresponde a una $\lambda = 1.1 \mu m$. Debido a que según la ecuación (8.1), la energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda, esta energía se puede obtener con radiación de longitud de onda, igual o menores que $1.1 \mu m$ y al valor máximo de λ se le conoce como anchura de la **banda prohibida**. Esto quiere decir que sólo los fotones solares de energía igual o superior a ese valor, son absorbidos por el material, mientras que los de λ mayores no tienen la energía suficiente para ser absorbidos. Esto implica que aproximadamente el 40% de la radiación solar que recibimos no es útil para producir el efecto fotovoltaico. Por otra parte, los fotones de energía elevada correspondientes a la región violeta y ultravioleta del espectro, son fuertemente absorbidos en la superficie del **Si** y generan pares de carga que se recombinan antes de ser separados por el campo eléctrico existente en la unión p-n.

De acuerdo con estas consideraciones, se tiene que la respuesta óptica de la célula solar de silicio se extiende desde longitudes de onda de aproximadamente 0.4 a $1.1 \mu m$, con un máximo alrededor de $0.85 \mu m$, como se observa en la figura 8.4. En la tabla 8.1 se presentan además algunas características generales de las células de **Si monocristalino**.



Figura 8.4. Respuesta espectral de la célula de **Si monocristalino**.

Tabla 8.1. Características generales de las células de **Si** actuales.

Material	Si monocristalino
Diámetro	≈ 10 cm
Espesor	≈ 300-400 μm
Con insolación ≈ 1 kW/m ² (AM1) la C.S. genera:	
Corriente en cortocircuito (Isc)	≈ 2.2 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	≈ 0.5 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Im)	≈ 2.0 A
Tensión en el punto de máxima potencia (Vm)	

Potencia máxima (Wm)	≈ 0.48 V
Rendimientos actuales (η)	≈ 1.0 W
	≈ 10-14 %

4. Rendimiento del proceso fotovoltaico.

El rendimiento de operación de una célula solar se define como el cociente entre la energía eléctrica producida y la energía solar interceptada por su superficie. Cuando se optimiza la carga que la célula debe alimentar el rendimiento es máximo y está dado por la siguiente ecuación:

$$h = \frac{P_m}{I} = \frac{(I_m)(V_m)}{I} \quad (8.109)$$

donde **I** es el producto de la insolación por la superficie efectiva de la célula, **P_m** la potencia máxima, **I_m** la corriente en el punto de máxima potencia y **V_m** la tensión en el punto de máxima potencia. (Ver tabla 8.1).

Existen ciertos factores que influyen en mayor o menor medida en el rendimiento de una célula solar. Estos pueden ser de origen interno o externo como características del material, espesor de la oblea, superficie activa, geometría de los contactos, etc. También pueden ser factores ambientales como temperatura de operación y composición espectral de la radiación. Al aumentar la temperatura por encima del ambiente (40-45 °C), el rendimiento disminuye, razón por la que sería conveniente refrigerar la células solares.

La figura 8.5 muestra los valores teóricos calculados para diferentes materiales semiconductores en función de la banda prohibida y suponiendo insolación extraterrestre. Si el cálculo se repite con la energía que se recibe en la superficie terrestre, se conserva la forma de las curvas pero los rendimientos se hacen algo menores. Por ejemplo, el máximo rendimiento teórico de la célula de silicio es del orden del 22-23%, mientras que en la práctica el máximo obtenido es del orden del 18%. En general, las celdas fotovoltaicas disponibles en el mercado tienen rendimientos del orden del 14-15%, el cual disminuye al 10-11% cuando se montan en paneles fotovoltaicos.

Un concepto útil al trabajar con células solares es la **potencia pico** de una célula fotovoltaica. Esta se denomina como la potencia eléctrica que proporciona la célula cuando recibe irradiancia máxima (aprox. 1 kW/m²), es decir, al mediodía de un día despejado.



Figura 8.5. Rendimientos máximos teóricos, suponiendo radiación extraterrestre, de células solares fabricadas con diferentes semiconductores.

8.3 TECNOLOGIA DE FABRICACION DE CELULAS Y MODULOS FOTOVOLTAICOS.

Debido a que una célula solar genera corrientes y tensiones pequeños, éstas no son los elementos que se utilizan en las aplicaciones prácticas, sino que, con objeto de lograr potencias mayores, se acoplan en serie o en paralelo para obtener mayores tensiones y corrientes formando lo que se denomina **módulo fotovoltaico**, que es el elemento que se comercializa. A la vez, estos módulos se conectan en serie o en paralelo para obtener las tensiones y corrientes que nos den la potencia deseada. Módulos en serie aumentan el voltaje y conservan la misma corriente, mientras que módulos en paralelo aumentan la corriente, conservando el mismo voltaje. Los módulos generalmente se fabrican para tener una salida de 12 VCD. En la figura 8.6 se muestra un diagrama con la evolución desde la célula solar hasta el campo de paneles, base de las centrales fotovoltaicas.



Figura 8.6. Evolución desde la célula solar al campo de paneles.

El proceso de fabricación de las células solares de silicio lo podemos dividir en tres grandes etapas:

- a) Obtención del **Si** de alta pureza. Este se obtiene a partir del óxido de silicio, **SiO₂**, básicamente cuarzo, cuya abundancia en la naturaleza elimina problemas de abastecimiento. Este tiene que ser de alta pureza, semejante al semiconductor que se utiliza en la industria electrónica. Actualmente se está trabajando con silicio de menor pureza, pero útil para la fabricación de células solares y a un menor costo.
- b) Obtención de obleas. Utilizando como materia prima polvo de silicio de alta pureza se hace crecer el monocristal hasta obtener una pieza cilíndrica de diámetro variable entre 2 y 20 cm y longitud de alrededor de 1 m. El crecimiento del monocristal sirve para purificar el material y para la creación de una estructura perfecta, gracias a la cual la futura oblea gozará de propiedades semiconductoras.

La barra de silicio se corta mediante sierras especiales produciendo obleas de espesor aproximado de 300 μ m. En esta etapa hay una pérdida de material de aproximadamente el 60% en forma de serrín. Actualmente existen otras formas más eficientes de cortado de la barra.

- c) Procesamiento de la oblea. Para obtener finalmente la célula solar, la oblea sufre un procesamiento que consiste de los siguientes pasos: lapeado y pulido, formación de unión p-n, decapado y limpieza, capa antirreflectante, fotolitografía para formación de contactos, formación de contactos o electrodos, material para soldadura de electrodos, limpieza del decapante y comprobación de las características de la celda. La formación de la unión p-n es la etapa más crítica de todo el proceso de fabricación, debido a que el buen funcionamiento

de la célula solar depende en gran medida de una buena unión p-n. Por otro lado, una adecuada capa antirreflejante también es necesaria, ya que una superficie de **Si** bien pulida puede llegar a reflejar hasta el 34% de la radiación de onda larga y un 54% si la radiación es de onda corta.

8.4 ESTRUCTURA DE UN GENERADOR FOTOVOLTAICO.

Suele llamarse generador fotovoltaico al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar mediante las células solares. La estructura de un generador es variable según la aplicación a la que está destinado, aunque algunos elementos tienen que estar presentes necesariamente. Para fines prácticos, podemos decir que hay dos grandes grupos de generadores: los **autónomos**, que constituyen una fuente de energía eléctrica independiente de la red general de electricidad y que por lo tanto precisan de algún sistema de almacenamiento de energía eléctrica; y los **no autónomos**, que operan en conjunto con dicha red y que pueden prescindir del sistema de almacenamiento.

En la figura 8.7 se muestra un diagrama con algunas estructuras utilizadas en los generadores fotovoltaicos.

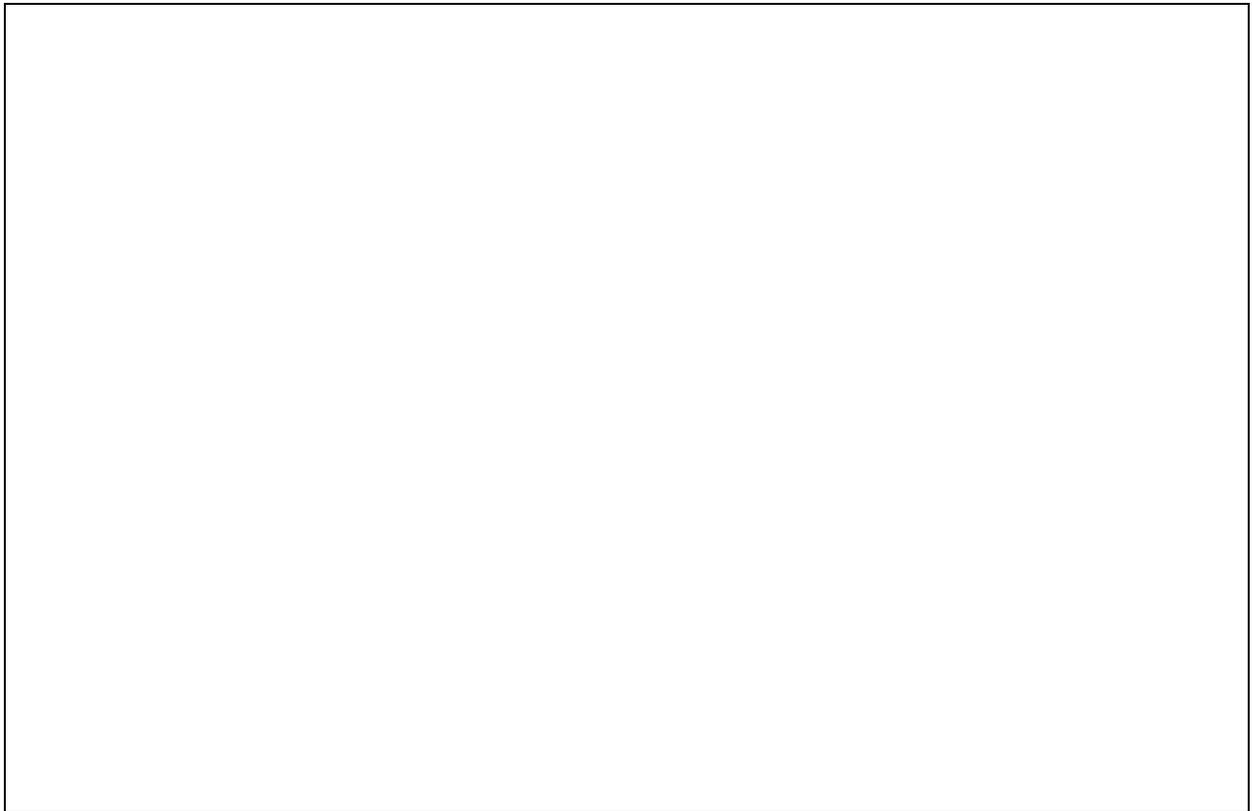


Figura 8.7. Diversas estructuras de los generadores fotovoltaicos.

Los generadores fotovoltaicos autónomos se componen de tres subsistemas: **el panel fotovoltaico**, donde la energía solar se convierte en corriente continua, **el regulador-conversor electrónico** y **el subsistema de almacenamiento**, que generalmente son baterías electroquímicas. El acoplamiento de estos tres subsistemas se hace en función del tipo de consumo que vaya a satisfacer el generador fotovoltaico, como se observa en la figura 8.7, donde el esquema inferior describe un generador híbrido. El regulador tiene la doble función de evitar la sobrecarga de las baterías desconectándolas cuando ya están cargadas, y evitar la descarga de las mismas en períodos en que los paneles no generan suficiente energía por haber baja la insolación o ser de noche.

Otra característica importante de los generadores fotovoltaicos es su carácter modular. Por **modularidad** se entiende la posibilidad de ampliar la potencia pico instalada por acoplamiento de nuevos paneles. Así, el sistema se adapta a la demanda sin la necesidad de adquirir un nuevo generador.

Por otro lado, el sistema de paneles fotovoltaicos posee una vida larga, unos 20 a 25 años, al final de los cuales su rendimiento debe ser del orden del 75% del inicial. Después de este tiempo, su degradación se acelera y desciende el rendimiento hasta valores despreciables.

8.5 APLICACIONES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Desde un punto de vista histórico, el motivo de la construcción de las celdas fotovoltaicas fueron los satélites artificiales. La idea era construir un generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos que llevaban a bordo, que presentara ventajas con respecto a otros generadores como los termoelectricos y las pilas de combustible. De hecho, las ventajas encontradas en este tipo de generadores fueron: peso reducido, larga vida, ocupación de espacio mínima y nivel de insolación elevado y continuo por estar fuera de la atmósfera terrestre, aunque sus costos eran muy elevados. Para aplicaciones terrestres, el factor económico era muy importante si se deseaba tener una aplicación más generalizada y por lo tanto, desde esos años (1972-73), se inició una tremenda carrera cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos, e investigación de nuevos materiales, que condujeran a un abaratamiento de las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico. Dichos esfuerzos han rendido ya sus frutos y encontramos que en la actualidad los precios han bajado drásticamente y existen muchas más aplicaciones de las células solares, las cuales mencionaremos brevemente a continuación:

- a) Electrificación rural y de viviendas aisladas. Existen muchas zonas rurales y viviendas aisladas donde llevar energía eléctrica por medio de la red general sería demasiado costoso y por lo tanto no cuentan con este servicio. En este caso, la instalación de un generador fotovoltaico es ampliamente rentable.
- b) Comunicaciones. Los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado, por ejemplo, reemisores de señales de TV, plataformas de telemetría, radioenlaces, estaciones meteorológicas.
- c) Ayudas a la navegación. Aquí la aplicación puede ser relativa a la navegación misma o a sus señalizaciones, como alimentar eléctricamente faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones.

- d) Transporte terrestre. Iluminación de cruces de carretera peligrosos y túneles largos. Alimentación de radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro lejos de líneas eléctricas. Señalizaciones de pasos a desnivel o cambio de vías en los ferrocarriles.
- e) Agricultura y ganadería. Se está teniendo una atención muy espacial en estos sectores. Mediante generadores fotovoltaicos podemos obtener la energía eléctrica necesaria para granjas que conviene que estén aisladas de la zonas urbanas por motivos de higiene. Sin embargo, la aplicación más importante y de futuro es el bombeo de agua para riego y alimentación de ganado que normalmente se encuentra en zonas no pobladas. Otras aplicaciones pueden ser la vigilancia forestal para prevención de incendios.
- f) Aplicaciones en la industria. Una de las principales aplicaciones en este campo es la obtención de metales como cobre, aluminio y plata, por electrólisis y la fabricación de acumuladores electroquímicos.
- g) Difusión de la cultura. Televisión escolar para zonas aisladas. Difusión de información mediante medios audiovisuales alimentados eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos.

Vale la pena mencionar que en la actualidad también se está trabajando con generadores mixtos o híbridos, esto es, adaptar el generador fotovoltaico con otros generadores ya existentes como los eólicos o los generadores diesel. También podemos mencionar que actualmente se han construido algunas centrales fotovoltaicas que proporcionan una potencia considerable y que en un momento dado pueden llegar a ser rentables en ciertos casos, comparadas con las centrales tradicionales como las termoeléctricas o hidráulicas.

EJERCICIOS

Leer y entregar un resumen del artículo sobre las aplicaciones de las celdas solares que se dará en la clase correspondiente.

PARTE III

APLICACIONES REALES Y POTENCIALES DE LA ENERGIA SOLAR

CALEFACCION DE AGUA DOMESTICA

Capítulo 9

9.1 INTRODUCCION.

Una de las aplicaciones de la energía solar que ha tenido mayor uso y divulgación es la calefacción de agua para consumo doméstico. Las primeras patentes de calentadores solares aparecieron en Estados Unidos hacia finales del siglo XIX. En México se han estado utilizando y desarrollando desde la década de los 40.

En los lugares con buen clima y buena insolación, los calentadores solares pueden ahorrar una fracción considerable del combustible para uso doméstico. En las condiciones de Guadalajara, es posible que más de la mitad del consumo de gas LP doméstico se deba al calentamiento de agua para baños. El resto se usa para cocina. Por otro lado, en lugares con clima extremo, no basta el calentador solar para tener un ahorro tan significativo, dado que el principal consumo de energía se debe al aire acondicionado en verano, y a la calefacción en invierno.

9.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO.

La mayoría de las aplicaciones de la energía solar, particularmente las que proporcionan un servicio que se requiere en forma continua, es decir, no sólo cuando hay insolación, requieren al menos dos elementos que ya se han descrito en capítulos anteriores: un **colector**, en donde se transforme la luz solar en el efecto deseado, y un **almacén**, en donde se pueda tener una "reserva" del efecto deseado, para cuando no hay insolación. Los calentadores solares, entonces, requieren por lo general de estos dos elementos,

Como se vió en el Capítulo 5, la decisión de qué colector emplear en un diseño depende de las temperaturas que se requiera obtener. En el caso de los calentadores solares domésticos, las temperaturas requeridas son del orden de 40 a 60 °C. Esto implica que los colectores más adecuados, independientemente de otras ventajas que puedan tener, son los de placa plana. Dependiendo del diseño particular del calentador, puede requerir una o dos cubiertas transparentes. Como se mencionó en el capítulo de colectores planos, una de las virtudes de este tipo de colector es que no sólo capta la radiación directa, sino también la difusa. Esto significa que un calentador solar bien dimensionado puede trabajar satisfactoriamente no sólo en días soleados, sino en días medio nublados, siempre que la irradiación total no caiga por debajo de ciertos límites y los usuarios no desperdicien el agua caliente.

Debido a que muchos usuarios prefieren el baño diario matutino, después de unas horas en las que no ha habido insolación, es necesario y práctico tener una reserva de agua caliente, considerando además que, en días muy nublados puede haber una baja significativa de la irradiancia solar. Con el uso de una reserva de agua caliente se logra satisfacer la demanda de agua caliente en más del 95% de los días del año.

9.3 TIPOS BASICOS DE CALENTADORES SOLARES.

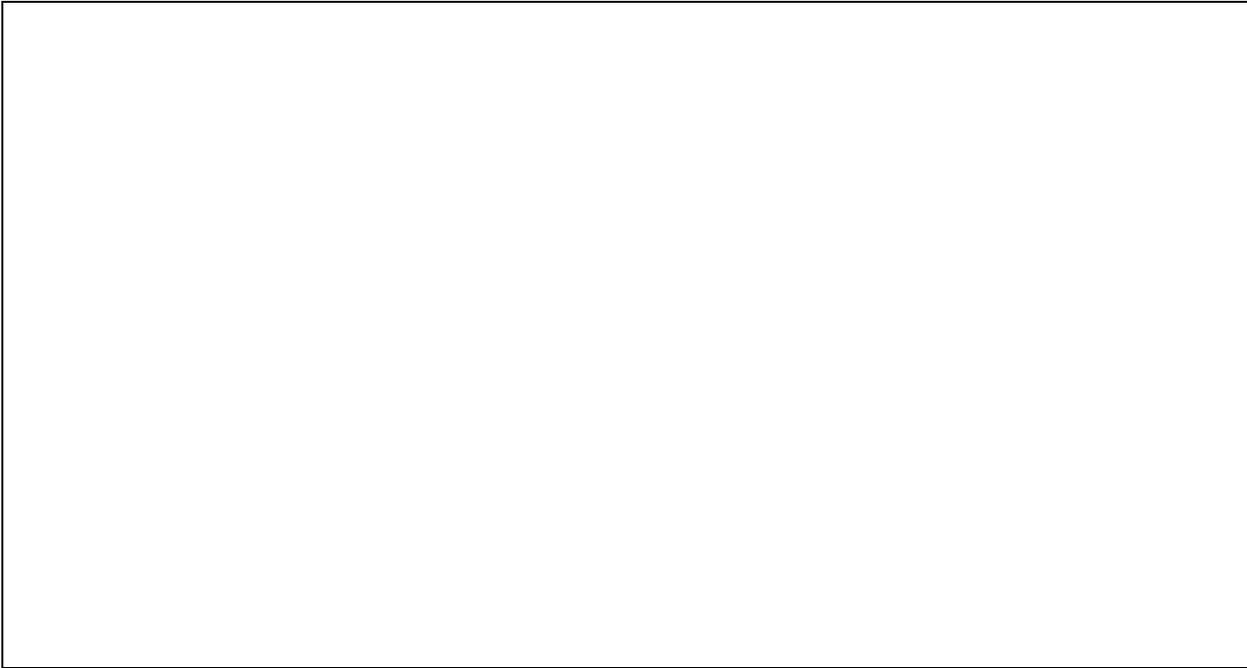
En esta sección hablaremos de los tipos básicos de calentadores solares que han tenido algún éxito comercial o tecnológico.

1. Calentador solar autocontenido.

Este es uno de los calentadores solares más simples que se pueden concebir (descartando, por supuesto, un garrafón o tina con agua directamente expuestos al Sol).

El calentador autocontenido es simplemente un recipiente (una caja, un tambo, varios tambos pequeños, etc.) dispuesto de tal manera que presente su mayor área hacia la posición promedio del Sol. Esta cara se pinta de negro y hace las veces de colector solar. El recipiente se llena con agua, que se calienta directamente por contacto con la cara expuesta al Sol. Por los lados y el fondo se aísla térmicamente para evitar las fugas de calor. La figura 9.1 muestra un corte esquemático de un calentador solar autocontenido.

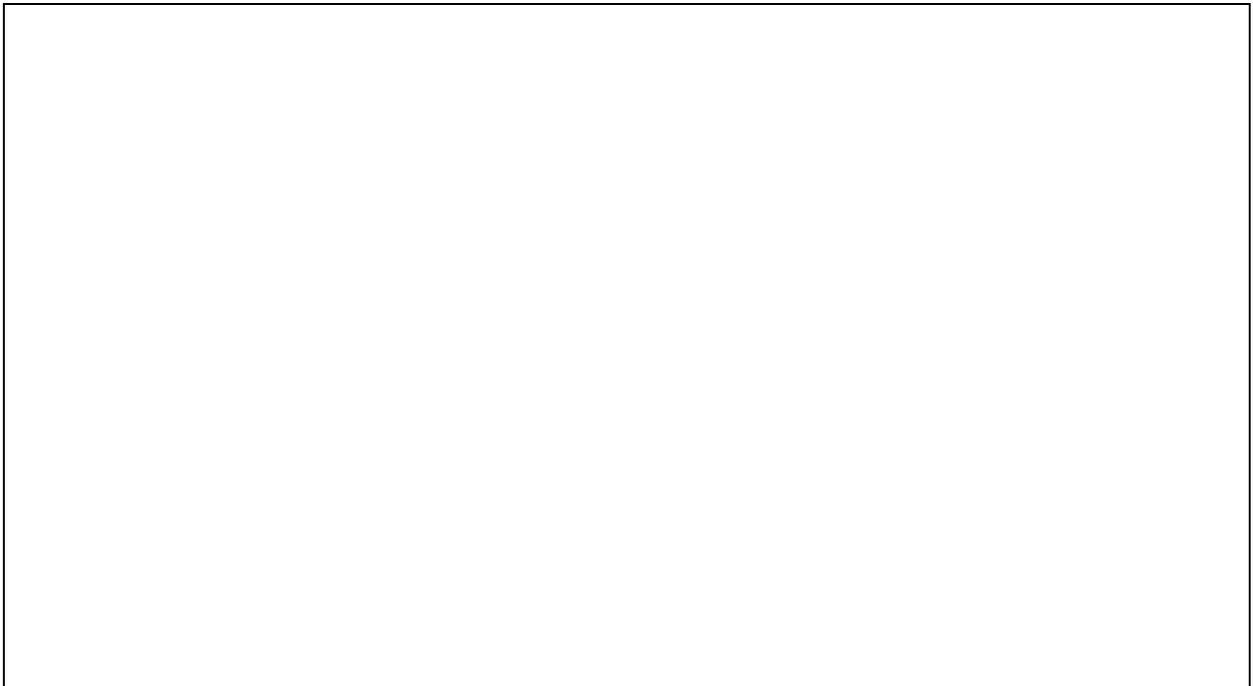
El nombre de "autocontenido" viene de que en el mismo elemento físico del sistema se conjugan las funciones de colector y de termo almacén. Como puede verse, esto es algo así como exigir funciones contrarias en un mismo elemento del sistema. Por un lado, la parte superior del recipiente debe hacer las veces de colector, es decir, funcionar como un elemento para la transferencia de calor, del Sol al agua. Por otro lado, como en el mismo recipiente se mantiene almacenada el agua caliente, debe hacer las veces de termo, que es la función opuesta a un colector. Es por esto que en este tipo de calentadores solares se utilizan dos capas de vidrio (o del material transparente de la cubierta). Esta es una forma de lograr que durante el día entre la radiación solar hasta la placa negra, pero durante la noche pierda relativamente poco calor. Diversos estudios han demostrado que si se utiliza sólo una capa de vidrio (o ninguna), las pérdidas nocturnas son tan altas, que al amanecer casi se ha perdido la energía colectada el día anterior. Por otro lado, tres o más capas de vidrio dan como resultado demasiadas reflexiones y absorciones en los vidrios, de manera que, aunque la pérdida se ve efectivamente disminuida, lo que sufre más son las ganancias térmicas



durante el día.

Un parámetro importante en el diseño de los calentadores solares autocontenidos es su espesor promedio. Definimos éste como el cociente entre el volumen(m^3) del recipiente y el área (m^2) expuesta al Sol a mediodía. Un calentador autocontenido deberá tener un espesor promedio menor que 0.4 m, con el objeto de tener una buena relación de área de colección solar a volumen de agua por calentar. Quizá el óptimo se encuentre alrededor de 0.2 m. Con espesores promedio menores, también hay un aumento significativo de pérdidas nocturnas, por lo que no es deseable reducir mucho este parámetro.

La figura 9.2 muestra los resultados de un día de experimentación con este tipo de calentadores solares. Nótese que las temperaturas dentro del colector pueden llegar a 70 grados centígrados. La eficiencia térmica de este tipo de calentadores es relativamente alta, del orden de 45%, si se evalúa únicamente para el período diurno. Esta eficiencia cae bastante si se toma en cuenta la pérdida nocturna. Las características de funcionamiento de este calentador lo hacen idóneo para usar el agua caliente durante el mismo día, a partir del mediodía, hacia la tarde o al comenzar



la noche.

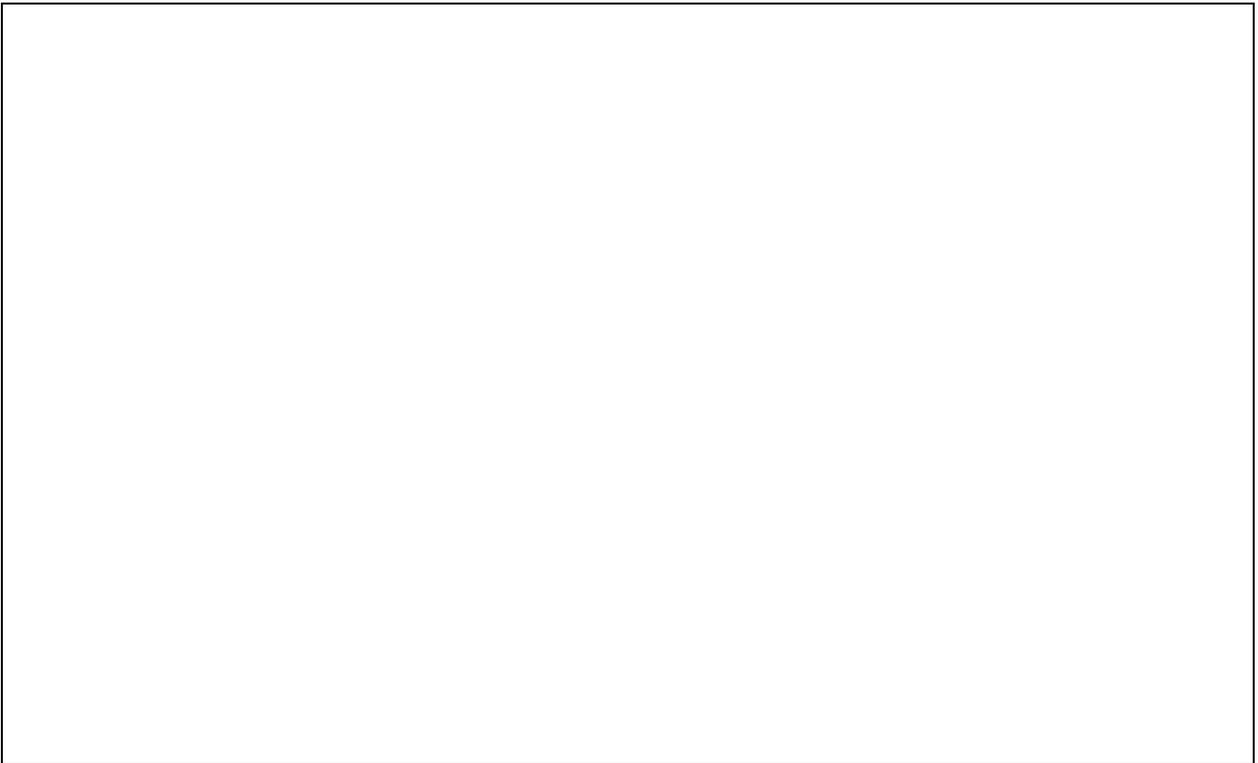
Un tamaño muy común en este tipo de calentadores es de 200 litros de capacidad. Esto es suficiente para dos o tres personas. Una ventaja característica de este tipo de calentador es que fácilmente se pueden instalar más unidades en paralelo. En otras palabras, es muy fácil tener un crecimiento modular para un mayor número de usuarios. En general, este tipo de calentadores sólo pueden soportar presiones moderadas entre 1 y 2 m. de columna de agua. En ocasiones se requiere un "rompepresión", es decir, un elemento que permita trabajar al calentador con muy poca columna de agua sobre él, independientemente de la altura a la que se encuentre el tinaco de alimentación.

2. Calentador solar por convección natural.

Un siguiente paso en la "evolución" de los calentadores solares consiste en separar físicamente el colector solar del tanque de almacenamiento. Con esto, cada elemento del sistema puede ser diseñado y construido para realizar eficientemente su función. En este esquema, entonces, se calienta

el agua dentro de los tubos o placas de un colector plano, para luego transferirla al termo de almacenamiento. Existen básicamente dos técnicas para transferir el agua caliente del colector al termo: la convección natural y la convección forzada.

En el calentador por convección natural, también llamado **termosifón**, la fuerza impulsora que mueve el agua desde el colector hacia el termo es de tipo hidrostático, un empuje asociado con el principio de Arquímedes. El agua contenida en el colector, a medida que se calienta, disminuye su densidad. Si existe un circuito cerrado y adecuadamente construido entre el colector y el termo, es posible aprovechar esta disminución de densidad para que el agua caliente fluya espontáneamente de la parte más alta del colector hacia la parte alta del termo. Al mismo tiempo, el agua de la parte baja del termo, que se encuentra a menor temperatura, fluye hacia la parte más baja del colector. El



termo, pues, siempre debe encontrarse, en este esquema, a mayor altura que el colector.

Este sistema de convección natural tiene ventajas y desventajas. La primera ventaja, respecto del calentador autocontenido, consiste en que, al llegar la noche o disminuir significativamente la irradiancia solar, el proceso de convección natural se detiene. Por tanto, la energía térmica almacenada en el termo no tiende a perderse a través del colector, sino únicamente a través de su propio aislante que, suponemos, es un buen aislante. Así, la pérdida de temperatura durante la noche es mucho menor que en el calentador autocontenido. Una ventaja, respecto del calentador por convección forzada que veremos después, es que el de convección natural no requiere energía extra para mover el agua. Puede decirse que el mismo Sol proporciona la energía para ello.

La desventaja principal de este tipo de sistemas se encuentra, quizá, en los lugares con clima muy extremo, en donde las temperaturas ambientales puedan llegar a las temperaturas de congelación. En estos lugares no es recomendable el uso de calentadores por convección natural, porque la congelación nocturna del agua dentro de los colectores puede dar lugar a que se revienten sus tuberías, quedando dañado permanentemente. Por último, otra posible desventaja consiste en

algo que ya señalamos: el termo debe estar a una altura mayor que la del colector. La fuente de alimentación, generalmente un tinaco, debe estar a mayor altura que el termo. En muchas azoteas no planeadas para la instalación de un calentador por convección natural, es necesario construir torres para reubicar el tinaco. Esto puede tener efectos arquitectónicos indeseables.

Las dimensiones características de un calentador por convección natural están dadas por el número de usuarios. Como regla general, y sin ninguna deducción científica de por medio, se recomienda tener un metro cuadrado de colector por cada usuario, así como alrededor de cien litros de capacidad en el termo, también por cada usuario. En lugares con buen clima y buena insolación, estas proporciones permiten suministrar agua caliente a más de 40 grados centígrados (indispensable mezclarla con agua fría), durante el 95% del año. Nótese que los datos aquí mencionados equivalen a un espesor promedio de 0.1 metro, según se definió en los calentadores autocontenidos. La siguiente tabla da los parámetros más comunes que hemos utilizado en el lteso, para la instalación de estos calentadores.

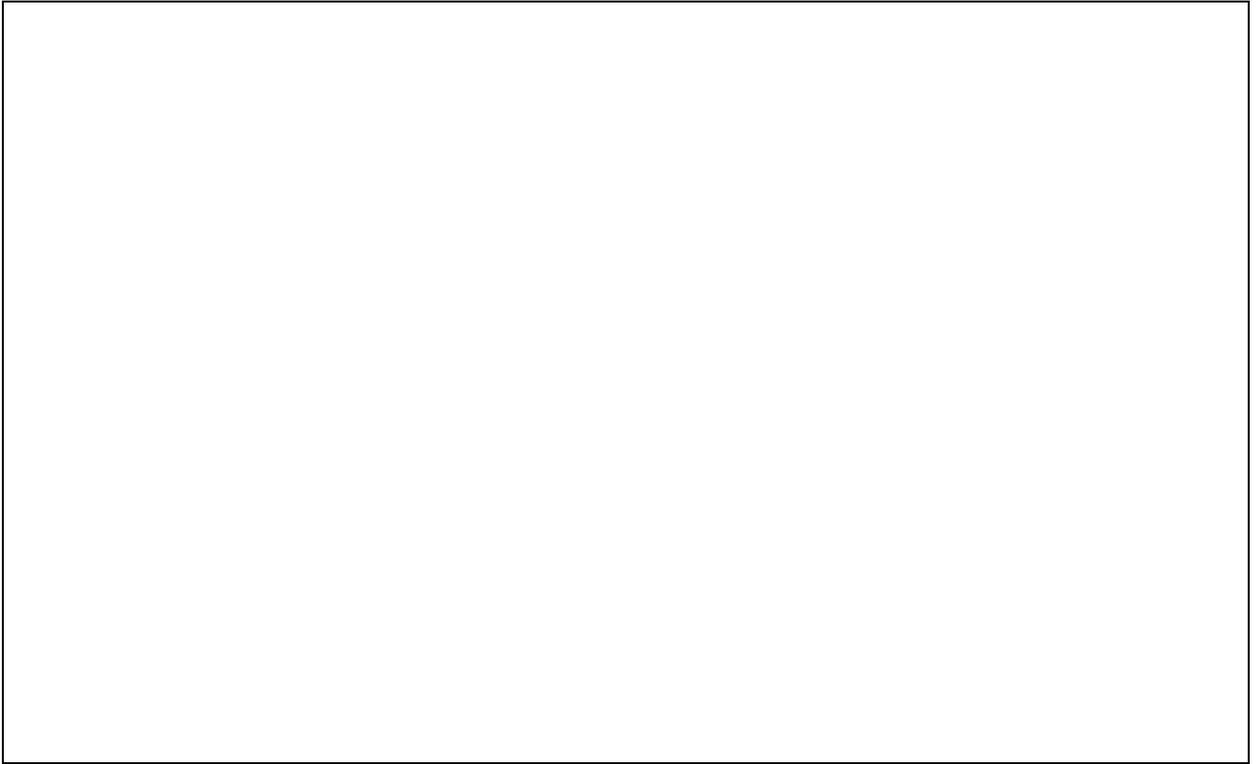
Tabla 9.1 Parámetros utilizados para la instalación de calentadores.		
Capacidad (litros)	Área de Colección (m ²)	Número de usuarios
300	3	3-4
600	6	5-7
1000	9	8-10
2000	14	14-20

Algunos fabricantes, con el objetivo de ahorrar costos, proporcionan una menor área de colección o volumen de termo por usuario. Esto puede funcionar adecuadamente en los días muy soleados, pero ciertamente se verá en desventaja ante la presencia de nublados o de un aumento en la demanda de agua caliente.

3. Calentador solar de convección forzada.

Para los lugares donde los inconvenientes del calentador solar por convección natural son importantes, existe otra alternativa: utilizar convección forzada, es decir, emplear una pequeña bomba para hacer circular el agua entre el colector y el termo. Con esto se evita completamente la necesidad de que el termo esté a mayor altura que el colector. Podría incluso estar el colector en la azotea y el termo en un sótano. La otra desventaja, la congelación del agua en las tuberías, también puede eliminarse mediante un sistema de convección forzada, pero en este caso se requiere algún otro fluido de trabajo, o al menos agua con anticongelante, al igual que en los radiadores de automóvil. Debido a esto, no es posible utilizar la misma agua que se utiliza en el colector, y se requiere un intercambiador de calor, para transferir el calor del fluido de trabajo al agua.

Otro elemento importante en un calentador por convección forzada, es un termostato diferencial o control diferencial de temperatura (**CDT**) para encender o apagar la bomba, según se requiera. Este termostato debe tener un sensor a la salida del colector y otro en el termo, para mandar la señal de encender la bomba sólo cuando el colector se encuentre a una temperatura suficientemente mayor que la del termo. De otro modo, el colector podría funcionar como enfriador. Cabe aclarar que, para esta función no basta un "timer" o controlador de tiempo (que podría funcionar en el caso de calentadores de alberca) sino que se requiere un tipo de control que sea sensible a las variaciones diurnas de la irradiancia solar, o sombros que puedan existir sobre el colector.



POTABILIZACION DE AGUA

Capítulo 11

11.1 INTRODUCCION.

Otra de las aplicaciones prácticas de la energía solar es la potabilización de agua. Mediante las diversas variantes de esta técnica es posible producir agua potable a partir de agua contaminada. Como esto puede lograrse mediante tecnología relativamente simple, esta aplicación resulta especialmente útil para regiones alejadas de las comodidades de la civilización, como islas y regiones costeras poco comunicadas. Pero también pueden encontrarse aplicaciones técnica y económicamente factibles en otros lugares.

Dependiendo del grado de contaminación que contenga el agua, existen diversas tecnologías solares para su purificación. En general, los sistemas solares para la purificación de agua son capaces de remover sólo cantidades relativamente pequeñas de contaminación, con excepción quizás, de los que se utilizan para purificar agua de mar. Los destiladores solares, pues, no son adecuados para purificar aguas negras ni residuos industriales. Son adecuados para potabilizar aguas superficiales (ríos, lagos), aguas subterráneas o agua de mar. Básicamente habría que considerar dos niveles de contaminación para los cuales son adecuados: 1) Agua con contaminación microbiana ligera y 2) Agua con contaminación de sales disueltas.

11.2 AGUA CON CONTAMINACIÓN MICROBIANA LIGERA.

Existe una diversidad de casos en los que el agua no contiene sales inadecuadas para su potabilidad, pero sí microorganismos patógenos o indeseables. Para este caso es posible eliminar la contaminación microbiana mediante un calentamiento en un calentador solar operando en condiciones adecuadas para ello. Un calentador, como los descritos en el Capítulo 9, si se destina exclusivamente para la purificación de agua, esto es, dejando que alcance las máximas temperaturas que puede producir, es capaz de eliminar los microorganismos. Para eliminar los microorganismos no se requiere llegar a la temperatura de ebullición, sino que basta pasar de los 60°C, pero sostenerlos durante varios minutos. Existen algunos estudios experimentales en los que se reporta haber eliminado con éxito una diversidad de microorganismos, en forma continua durante varios meses.

11.3 AGUA CON CONTAMINACIÓN DE SALES DISUELTAS.

Otro caso consiste en aguas contaminadas con sales disueltas indeseables, independientemente de que además contengan microorganismos. Con mucho, el caso más común es el del agua de mar, pero también puede encontrarse este problema en aguas continentales, salobres o con algún residuo específico indeseable. Algunos ejemplos son: arsénico en la comarca lagunera en Coahuila; residuos de fertilizantes en muchas norias de regiones agrícolas; residuos azufrosos en las aguas termales; contenido de compuestos indeseables en la cuenca del Lerma-Chapala-Santiago, etc.

Desde el punto de vista técnico, no existen muchas alternativas para retirar las sales disueltas en el agua. Las principales son: a) la desalación por medio de evaporación y condensación, b) la

desalación por medio de congelación parcial y fusión, c) la desalación por ósmosis inversa y d) el intercambio iónico. Esta última, muy común en algunos procesos industriales, realmente no retira las sales, sino que únicamente cambia un tipo de sales por otras de diferente ión metálico.

De todas las alternativas mencionadas, la que más se presta para acoplarla con un sistema solar, es la desalación por evaporación y condensación. En el argot de la Ingeniería Química, esto se llama simplemente "desalación"; sin embargo, la costumbre ha hecho que en el mundo de la energía solar se conozca como **destilación solar**. (En ingeniería química, el término **destilación** se aplica a la técnica de separación de sustancias volátiles aprovechando su diferente volatilidad, como en el caso de las mezclas alcohol-agua, benceno-tolueno y los hidrocarburos que forman el petróleo; cuando los componentes que se desea separar no son volátiles, por ejemplo sales, se llama "desalación").

El proceso, en principio, es muy sencillo. Simplemente se coloca el agua en un recipiente donde se pueda calentar mediante algún efecto solar, desde por irradiación directa, hasta por medio de colectores. Al calentarse el agua se evapora, dejando las sales, y posteriormente se condensa en alguna parte del equipo en donde no pueda mezclarse con el agua contaminada.

Se llama **destilando** o **salmuera** el agua contaminada cuyas sales o microorganismos se desea remover. Mediante el proceso de la destilación solar se obtiene el **destilado** que es, simplemente el agua condensada, ya sin sales.

11.4 EL DESTILADOR SOLAR DE CASETA.

Uno de los destiladores solares más simples y más comunes en la actualidad, se conoce como "destilador solar de caseta". La figura 11.1 muestra un bosquejo de un destilador de este tipo. Básicamente consiste en los elementos que describiremos a continuación:



Figura 11.1. Diagrama simplificado de un destilador de tipo "caseta".

1. Colector solar.

Como la mayoría de los sistemas térmicos para el aprovechamiento de la energía solar, los destiladores solares requieren un colector. Este consiste en una charola, amplia, extensa y poco profunda, de color negro en su cara superior, que se coloca en forma horizontal. Dentro de esta charola se coloca una pequeña cantidad de agua (alrededor de 2 a 3 cm de profundidad) la cual se calienta directamente por contacto con el fondo de la charola negra. Como todos los colectores que trabajan a temperaturas relativamente altas, se requiere un aislante térmico en las partes adecuadas, para evitar pérdidas de calor que no se traducen en el efecto deseado. El material del que se construya la charola colectora no es especialmente importante, desde el punto de vista térmico, pero sí desde otros puntos de vista. Por ejemplo, la lámina de hierro puede tener problemas de corrosión, aumentado precisamente por la presencia de las sales que se desea remover.

2. Evaporador.

La región en la que se lleva a cabo la evaporación del agua, técnicamente recibe el nombre de evaporador. En el caso particular del destilador de caseta, el evaporador es la misma charola que funge como colector. La superficie superior del destilando, es decir, el espejo de agua, es propiamente el evaporador. Con el objeto de que el agua logre temperaturas relativamente altas (del orden de 60 a 70 °C), es necesario que la profundidad de agua sea pequeña, tanto como sea posible. Las temperaturas altas favorecen el proceso de evaporación al aumentar exponencialmente la presión de vapor del agua. Por otro lado, como se explicó anteriormente, la eliminación de microorganismos requiere también de temperaturas altas. Sin embargo, en los destiladores de caseta es posible evaporar alrededor de 0.5 cm de profundidad de agua en un día. Debido a esto, no es recomendable que la profundidad sea menor que esta distancia, para evitar que se seque el evaporador. Existen otros diseños más sofisticados, en los que el evaporador es una unidad aparte del colector.

3. Cámara de aire.

Sobre el evaporador existe una región con aire, que separa a éste del condensador. La función del evaporador es transferir agua a el aire para saturarlo. La única función del aire es servir como medio de transporte para las moléculas de agua que viajan del evaporador al condensador. Los destiladores solares pequeños utilizan como medio para este "viaje" la difusión molecular. Para el proceso de difusión molecular, la distancia es un elemento de resistencia al transporte de las moléculas. Por tanto, la distancia que separa el evaporador del condensador debe ser tan pequeña como sea prácticamente posible, tomando en cuenta las limitaciones que mencionaremos a continuación.

4. Condensador.

El aire que separa el evaporador del condensador normalmente se encuentra saturado. Esto propicia la extracción del agua, en forma líquida, en alguna región que se encuentre a temperatura menor que el resto del sistema y particularmente que la temperatura del evaporador. Esta región se llama condensador. En un destilador de caseta, esto se logra colocando una cubierta de algún material transparente, a una cierta distancia sobre el evaporador. Típicamente se utiliza vidrio, o algunos

plásticos. Para que el condensador funcione eficientemente, en un destilador de caseta, debe tener varias características. Por ejemplo, debe ser un área relativamente grande, por lo menos semejante al área del evaporador. Debe estar ventilado (no aislado) para que se den los flujos de calor hacia el ambiente, tales que lo mantengan a menor temperatura que el resto del destilador. Debe tener una cierta inclinación, con el objeto de que el agua que se condensa sobre la cara interna del destilador escurra en la dirección deseada. Las inclinaciones típicas que se manejan son del orden de 20° a 30° respecto de la horizontal, pero algunos autores han reportado hasta 6°. La inclinación del condensador establece algunos compromisos: por un lado, si está demasiado cercano a la horizontal, el agua condensada puede gotear hacia la salmuera, disminuyendo con ello la eficiencia del destilador; por otro lado, si el condensador está muy inclinado, la separación entre evaporador y condensador puede aumentarse inconvenientemente, porque se desfavorece el proceso de difusión descrito anteriormente.

5. Elementos para la colección del condensado.

El destilado que escurre hacia abajo, a lo largo de la cubierta del condensador, debe ser recolectado de forma que no se contamine y no se reevapore. Para ello se utilizan unos pequeños canales casi horizontales, colocados en la parte baja del condensador, pero protegidos adecuadamente contra la posibilidad de que el destilado se mezcle con el destilando. Estos canales colectores se conectan con tuberías que conducen el destilado al punto deseado, que suele ser un almacén relativamente cercano.

Los materiales involucrados en la construcción de los elementos que conducen el destilado son muy importantes. El agua destilada es, por sí misma, inodora e insípida. Sin embargo, es muy ávida de adquirir sabores y olores extraños. La mayoría de los metales, los plásticos y los materiales cerámicos, transfieren al agua destilada un sabor característico. Los únicos materiales que hemos encontrado que no alteran el sabor del destilado son: el vidrio, el acero inoxidable y algunos plásticos (silicón, acrílico, PET) cuando están completamente curados.

11.5 PRODUCTIVIDAD Y OPERACION DE LOS DESTILADORES SOLARES.

La productividad típica de los destiladores solares de caseta (y de casi todos) es del orden de 3 a 5 litros diarios por metro cuadrado de destilador. Esta productividad depende no sólo del diseño del destilador, sino que depende fuertemente de muchos factores atmosféricos, de los cuales los principales son: la magnitud de la irradiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad de los vientos.

Como una aproximación gruesa, digamos que -dentro de ciertos límites- a mayor irradiación, a mayor velocidad del viento y a menor temperatura ambiente, la productividad de los destiladores de caseta aumenta. Una interpretación de estos fenómenos es que, a mayor irradiación se tiene mayor entrada de energía al colector y al evaporador, por lo cual se favorece la evaporación del destilando. Por otro lado, a menor temperatura ambiente y mayor velocidad del viento, se favorece la remoción de calor del condensador, con lo cual se favorece la condensación. Así, en una primera aproximación, se estarían favoreciendo ambos procesos necesarios para la purificación del agua en el destilador.

Cabe aclarar, sin embargo, que la realidad física del destilador no es tan sencilla; las condiciones del evaporador y del condensador están íntimamente ligadas entre sí por el intercambio térmico en el interior y hacia el exterior del destilador. Existen modelos que describen

detalladamente estos procesos, pero que por ahora escapan al objetivo de este curso. La figura 11.2 muestra esquemáticamente los principales flujos de calor que se dan espontáneamente en un destilador de caseta. Nótese que el intercambio térmico entre el evaporador y el condensador tiene varios elementos: evaporación-condensación, emisión de infrarrojo, luz reflejada y convección interna. De estos, todos menos la luz reflejada dependen de las temperaturas a las que se encuentren tanto el evaporador como el condensador. Y, a la inversa, las temperaturas de estos se ven influenciadas por dichos flujos de calor. La eficiencia térmica de un destilador solar se define como el cociente entre el calor transferido del evaporador al condensador por el mecanismo de evaporación-condensación, dividido entre la irradiación durante el período en cuestión. Una forma de medir el calor por evaporación-condensación, es medir el volumen de destilado y multiplicarlo por su calor latente de evaporación. Por tanto, una expresión para la eficiencia térmica de un destilador solar es:

$$h = \frac{m_d \Delta H_{vap}}{H_s A}$$

donde m_d es la masa de destilado obtenida en un día, kg; ΔH_{vap} es el calor de vaporización del agua, 2300 kJ/kg; H_s es la irradiación correspondiente, kJ/m²; A es el área del colector, m². Teórica y experimentalmente se ha demostrado que los destiladores de caseta tienen una eficiencia porcentual máxima del orden de 30 a 35%. En general, como una primera aproximación, de la ecuación anterior es posible estimar la productividad que un destilador puede tener en un lugar determinado.

Figura 11.2. Flujos de calor en un destilador solar de "caseta".

El dato de la productividad permite hacer algunas consideraciones. Primero, 3 a 5 litros diarios por metro cuadrado puede parecer un volumen muy pequeño. Sin embargo, desde el punto de vista de obtener agua potable a escala familiar o para pequeñas comunidades, en muchos casos puede resultar adecuado -especialmente donde esta alternativa sea económica-. La misma limitación en productividad hace poco viable la destilación solar para fines de purificación de agua en general, es decir, para fines no potables. Para el baño diario, para los servicios, para lavar el auto, bañar al perro y regar el jardín, no se requiere agua estrictamente potable. Por otro lado, si el destilador está construido adecuadamente, la calidad del agua que se obtiene es tal, que sirve incluso para el acumulador del automóvil, para planchas de vapor, etc.

Algunos detalles prácticos en la operación de los destiladores solares son los siguientes: 1) Nunca debe secarse la charola que funge como colector-evaporador. Cuando se seca, se depositan algunas sales sobre la pintura, se calienta excesivamente el destilador y se alteran algunas de las condiciones de sus superficies, que hacen que no vuelva a funcionar igual. 2) El destilador debe purgarse periódicamente. La excesiva acumulación de sales en el evaporador, aun disueltas, disminuye la tendencia del destilando a evaporarse. Esto se evita purgando el evaporador, con una frecuencia que depende de la concentración de sales en el destilando. En el caso de agua de mar puede ser diario o cada dos o tres días. En otros casos, puede ser mucho menos frecuente, pero igualmente necesario.

11.6 OTROS TIPOS DE DESTILADORES SOLARES.

Se han desarrollado otros tipos de destiladores solares, con el objeto de eliminar algunas de las inconveniencias del destilador de caseta. Mencionaremos sólo los principales.

1. Destilador solar en escalera.

Si en vez de una charola, en la construcción del evaporador se utilizan varias charolas alargadas, dipuestas en forma de escalera, es posible mantener todos los puntos del evaporador a menor distancia del condensador inclinado. Por otro lado, es posible orientarlo adecuadamente hacia la posición promedio del Sol. Por último, si se construye un ducto por detrás de la escalera, es posible incluso aumentar el área de condesnación y favorecer el movimiento de convección interna del destilador, como medio de transporte entre el evaporador y el condesnador.



Figura 11.3. Destilador solar en escalera.

2. Destilador solar con evaporador textil.

Con el objeto de minimizar el volumen de agua contenido en el evaporador, algunos autores han construido destiladores en los que el evaporador consiste en una o varias capas de tela absorbente, a través de la cual escurre permanentemente un flujo de agua. Este destilador tiene una alta respuesta a la irradiancia solar, pero es necesario tener un cierto control del gasto de destilando que se le hace pasar. Produce muy buenos rendimientos.

3. Destilador solar de múltiples efectos.

En este destilador se aprovecha el calor que el condensador debe perder, para calentar otro u otros evaporadores, en vez de cederlo al ambiente. Con ello, es posible aprovechar varias veces el calor solar captado en el colector. Teóricamente, es posible aumentar significativamente la productividad de los destiladores, pero se establecen intercambios térmicos entre los diversos "efectos" del destilador que no son sencillos de calcular y diseñar.

4. Destilador solar indirecto.

Algunos de los problemas inherentes al destilador solar de caseta, como el depósito indeseable de sales en el colector y los intercambios radiativos y convectivos, pueden en principio eliminarse si se separa la función de coleccionar la energía, de la de evaporar el destilando. Con un colector adecuado puede calentarse el agua, que se transfiere a otra unidad que haga las veces de evaporador-condensador. Con este sistema, que es más costoso que el destilador de caseta, no se ha logrado obtener mayor productividad que con aquél.

SECADO SOLAR

Capítulo 12

12.1 INTRODUCCIÓN.

Muchos productos agrícolas requieren un secado post-cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción.

El secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y es aún uno de los procesos agrícolas más utilizado en nuestro país y en muchos países del mundo. Este procedimiento es de muy bajo costo pero puede producir fuertes mermas ocasionadas por las lluvias durante el proceso de secado y el ataque de insectos y animales. Por otro lado, la calidad del producto se ve afectada por la contaminación de polvos e insectos.

En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permiten solucionar los problemas mencionados en relación al secado al aire libre.

12.2 EL PROCESO DE SECADO.

Secar significa remover cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. El término se emplea también al extraer líquidos orgánicos de materiales sólidos. El secado es un proceso en el que se intercambian calor y masa. Implica la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada. Incluye una operación energética elemental y representa una de las acciones térmicas básicas en la industria de procesos y agro-alimentaria.

El secado o deshidratación de alimentos se usa como técnica de preservación pues los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua.

Una de las maneras más simples para lograr el secado (de alimentos o cualquier material) es exponer el material húmedo a una corriente de aire con determinadas

condiciones de temperatura, humedad y velocidad. Entre más seco y más caliente esté el aire, mayor será la velocidad de secado. El calor se añade por contacto directo del producto a secar con aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire (Figura 12.1). Existen otros procesos de secado más complicados como el secado al



Figura 12.1. Eliminación de vapor de agua por medio de aire.

vacío o por congelación. En el secado al vacío la evaporación del agua se verifica con mayor rapidez y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación; en el secado por congelación el agua se sublima, pasando directamente del material congelado al aire.

1. Contenido de humedad de un producto.

El contenido de humedad, es decir, la cantidad de agua evaporable existente en un producto, se expresa en relación a su masa total o a su masa seca (esto es sin contar la masa de agua evaporable que contiene). Así se definen:

Contenido de Humedad en Base Húmeda, **M**:

$$M = \frac{m - m_s}{m} \quad (12.1)$$

Contenido de Humedad en Base Seca, **X**:

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (12.2)$$

donde: m: masa total del producto

m_s : masa seca del producto

La relación entre las dos ecuaciones anteriores es,

$$X = \frac{M}{1 - M} \quad M = \frac{X}{1 + X} \quad (12.3)$$

Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto. La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa del producto y la masa seca correspondiente. Para medir la masa seca de un alimento generalmente se le somete a 104°C, hasta que llegue a un peso constante. En el caso de productos que se descomponen por efecto de altas temperaturas, éstos se secan poniéndolos en una estufa de vacío a 60°C y a una presión mayor de 700 Pa, hasta que lleguen a un peso constante.

2. Contenido de humedad de equilibrio.

Al igual que en otros procesos de transferencia, como la transferencia de masa, el proceso de secado de materiales debe considerarse desde el punto de vista de las relaciones de equilibrio y de las de velocidad. Una variable importante en el secado de materiales es la humedad del aire en contacto con un sólido de determinada humedad. Supóngase que a un sólido húmedo se le aplica una corriente de aire con humedad y temperatura constantes. Supóngase, también, que se usa una gran cantidad de aire, por lo que las condiciones permanecen invariables.

Después de haber expuesto el sólido por tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio, llegará un momento en que éste tendrá un contenido de humedad definido. A este valor se le conoce como contenido de humedad de equilibrio del material, bajo las condiciones específicas de humedad y temperatura del aire. (Figura 13.2). Si el material contiene más humedad que su valor de equilibrio en contacto con un gas a determinada humedad y temperatura, se secará hasta alcanzar su valor de equilibrio. Si el material contiene menos humedad que su valor de equilibrio, absorberá agua hasta alcanzar dicho valor de equilibrio.

No es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que se hace necesario determinarlo por vías experimentales. De la misma manera, en muchos casos resulta indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado.

3. Comportamiento general del secado. Velocidad de secado.

En la figura 12.3 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Si se empieza con un tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final y la velocidad de evaporación irá en aumento.

Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este período inicial de ajuste con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado. La curva de la figura es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este período. A esta zona se le conoce como **región de velocidad de secado constante**. En el punto C de la gráfica, la velocidad de secado comienza a disminuir durante el período de velocidad decreciente, hasta llegar al punto D. Finalmente, en el punto D, la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde ya no es apreciable.

Durante el primer período de secado la superficie de sólido está muy mojada y sobre ella existe una película de agua (Figura 12.4 (a)). Esta capa de agua, llamada humedad no ligada, está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviera presente. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el período de velocidad constante proviene del interior del sólido. Este período continuará mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora.


Figura 12.2. Contenido de humedad en relación a la humedad relativa del aire de secado.

El punto C de la gráfica corresponde a la situación en la cual no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante este período de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto D.

El segundo período de velocidad decreciente empieza en el punto D. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie (Figura 12.4 (b)) El calor para la evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua vaporizada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el período de velocidad decreciente sea pequeña; no obstante, el tiempo requerido puede ser bastante largo.



Figura 12.3. Curva de velocidad de secado.



Figura 12.4 Desplazamiento del plano de evaporación.

12.3 CARACTERÍSTICAS DE UN SECADOR SOLAR.

1. Forma de calentamiento solar.

Los dos elementos básicos de un secador solar son: el **colector**, donde la radiación calienta el aire y la **cámara de secado**, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar:

Secador solar indirecto: Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional en que el sol actúa de fuente energética.

Secador solar directo: Los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

Secador solar mixto: Finalmente puede darse el caso en que la colección de radiación se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como en la misma cámara.

El Secador solar indirecto presenta varias ventajas. En primer lugar el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga.

Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder calidad de aspecto por una exposición directa al sol. Para productos a granel (principalmente granos en silos) si se contempla el secado solar, el sistema a emplear es el de un secador indirecto.

Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que al separar la función colección de energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos o mixtos.

En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado.

La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño.

Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural. Esto hace que a veces el control del proceso sea poco confiable. Para algunos productos la acción de la radiación solar puede destruir algún compuesto orgánico que lo compone y que tiene interés comercial.

2. Circulación de aire.

El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por diversos métodos:

Circulación forzada: El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica.

Circulación por convección natural: El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. No se necesita energía externa. El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural.

La circulación por convección natural permite el funcionamiento del equipo en zonas sin suministro local de energía eléctrica. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar cuando el equipo crece en tamaño. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0.4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0.1 a 0.3 m/s.

La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado. La circulación forzada permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 a 1 m/s y no hay problemas de circulación de aire para equipos de tamaño mayor.

La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

3. Forma de operación.

La forma de operar un secador da lugar a dos alternativas:

Secado en tandas: El producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina. Permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta apropiado en secadores pequeños y medianos.

Secado continuo: El producto se va cargando y descargando en tandas parciales. Dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. El período entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño. En algunos casos la carga y descarga parcial se realiza una vez por día. En otros casos se puede llevar a cabo varias veces en el mismo día.

4. Capacidad de producción.

La capacidad de producción se define en relación al peso del producto fresco total que se carga. En general, cada tipo de secador solar tiene un funcionamiento más apropiado en cierto rango de capacidad de producción. La tabla 12.1 muestra los rangos de capacidades aceptados con fines comparativos.

Tabla 12.1 Clasificación por capacidades	
Pequeña	20 kg/día
Baja	20-50
Mediana	50-500
Alta	más 500

12.4 TIPOS DE SECADORES SOLARES.

En esta parte se describirán algunos de los tipos de secadores solares más comunes.



Figura 12.5. Secado al aire libre.

Características:

Modo de calentamiento.....Directo
 Circulación de aire.....Acción del viento
 Forma de operación.....En tanda
 Capacidad de producción.....Baja o mediana



Figura 12.6. Secador de gabinete.

Características:

Modo de calentamiento.....Directo
Circulación de aire.....Convección natural
Forma de operación.....En tanda
Capacidad de producción.....Pequeña o baja

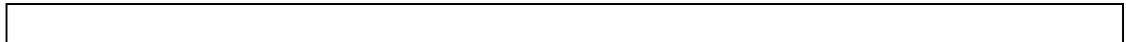


Figura 12.7. Secador indirecto o mixto de cabina.

Características:

Modo de calentamiento.....Indirecto
Circulación de aire.....Convección Natural
Forma de operación.....En tanda
Capacidad de producción.....Baja o media



Figura 12.8 Secador Indirecto de silo o cama.

Características:

Modo de calentamiento.....Indirecto
Circulación de aire.....Forzada
Forma de operación.....En tanda
Capacidad de producción.....Media a alta



Figura 12.9 Secador invernadero de circulación natural.

Características:

Modo de calentamiento.....Directo
Circulación de aire.....Convección Natural
Forma de operación.....En tanda

Capacidad de producción.....Baja o mediana



Figura 12.10. Secador-invernadero de circulación forzada.

Características:

Modo de calentamiento.....Mixto o indirecto

Circulación de aire.....Convección forzada

Forma de operación.....En tanda

Capacidad de producción.....Mediana

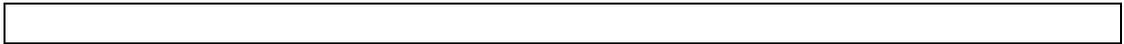


Figura 12.11. Secador Indirecto de circulación forzada.

Características:

Modo de calentamiento.....Mixto o indirecto

Circulación de aire.....Convección forzada

Forma de operación.....Continúa
Capacidad de producción.....Mediana o alta

EJERCICIOS

12.1 A continuación se muestran los resultados obtenidos experimentalmente al realizar un prueba de secado solar de plátanos.

Fecha de experimentación : marzo 19, 1993.

Peso inicial de la muestra de plátano : 260.4 gr.

Humedad inicial del plátano: 75 %

Tabla de registro de pesos de muestra y horas de secado

HORA	PESO DEL PLATANO (gr)
9:00 a.m.	260.4
10:00	200.6
11:00	179.0
12:00	151.7
13:00	117.0
14:00	94.0
15:00	78.5
16:00	64.7
17:00	57.7
18:00	52.2

a) Hacer una gráfica que muestre la variación de humedad en el plátano con respecto al tiempo. Hacerlo en base seca y base húmeda.

b) ¿Cuál es la humedad final de la muestra del plátano?

REFRIGERACION SOLAR

Capítulo 13

13.1 INTRODUCCION.

Uno de los métodos más antiguos de refrigeración y que en algunos lugares aún se sigue utilizando, es el que se basa en la fusión de hielo o nieve, que a la presión de 1 atm, tiene lugar a una temperatura de 0 °C. El hielo o nieve se colocan en el espacio o sobre los objetos que se quieren refrigerar o enfriar y que tienen una temperatura superior a los 0 °C. Según la segunda ley de la termodinámica, el calor fluirá espontáneamente de la región de mayor temperatura (espacio u objetos a refrigerar) hacia la región de menor temperatura (hielo o nieve), de manera que el espacio u objetos son enfriados. Esto ocurre también debido a que el hielo o nieve en esas condiciones de temperatura y presión ambiente, debe pasar al estado líquido y para hacer ese cambio de fase (sólido a líquido), se requiere de una determinada cantidad de calor (calor de fusión = 80 cal/gr) que es suministrada por los alrededores.

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

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

En los últimos años se ha venido trabajando en sistemas de refrigeración que utilizan la radiación solar para producir el efecto de enfriamiento. Dentro de las aplicaciones de la energía solar, esta es una de las más importantes e interesantes debido por un lado, al reto tecnológico que implica desarrollar sistemas de este tipo, y por el otro, al hecho de que en esta aplicación coincide la disponibilidad con la necesidad, esto es: entre más flujo de energía radiante llega a un determinado lugar, mas altas son las temperaturas ambientales y por lo tanto más se requiere de la refrigeración o enfriamiento. Por ejemplo, se tiene conocimiento de que en los países tropicales, casi no se consume carne y leche entre otros, porque se descomponen muy fácilmente y la mayoría de la gente de escasos recursos económicos no cuenta con sistemas de refrigeración para su conservación. También se sabe que en estos mismos países gran parte de las cosechas de frutas y verduras se pierden por la misma causa.

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

Debido a la intermitencia propia de la radiación solar, lo más sensato es pensar es sistemas de refrigeración intermitentes, aunque también se pueden desarrollar sistemas que operan continuamente, pero que necesitan de un sistema de almacenamiento y de una fuente auxiliar de

energía para que puedan seguir operando en las horas que no hay radiación solar (Noche y períodos con nublados intensos). El decidirse por algún tipo de sistema también tiene que ver con la aplicación que se le vaya a dar. Si el sistema se necesita para el acondicionamiento calorífico de viviendas o edificios generalmente se utilizan sistemas continuos que utilizan una mezcla de bromuro de litio-agua ($\text{BrLi-H}_2\text{O}$), pero si lo que se requiere es conservar alimentos o cualquier tipo de producto perecedero, un sistema intermitente podría dar buenos resultados. Estos, generalmente utiliza una mezcla de amoníaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) y logran temperaturas lo bastante bajas como para producir hielo. Los dos sistemas mencionados son los que se analizan en el texto.

En ITESO se ha trabajado en este campo a través del "Grupo Solar" del actual Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales. Se desarrolló y experimentó un prototipo de refrigerador solar intermitente, en el cual se logró producir los primeros kilogramos de hielo hechos 100% con energía solar en todo México.

En el capítulo se describen los principios de funcionamiento bajo los cuales operan los refrigeradores solares y en general los sistemas tradicionales. También se muestran algunas experiencias y resultados obtenidos en la experimentación del refrigerador solar desarrollado en iteso.

13.2 ASPECTOS TEORICOS SOBRE REFRIGERACION.

Termodinámicamente, cualquier sistema de refrigeración o enfriamiento es conocido como una máquina térmica invertida o como una máquina frigorífica (**MF**). Esta se ilustra en la figura 13.1 y se define como un dispositivo que toma calor (**Q_b**) de una región o fuente a temperatura baja (**T_b**) para cederlo (**Q_a**) a una región o sumidero a temperatura alta (**T_a**), siempre y cuando se realice un trabajo (**W**) sobre dicha máquina.

En este tipo de máquinas, nos interesa que el calor retirado de la región de temperatura baja (Q_b) sea el máximo y que la cantidad de trabajo suministrado (W) para que lo anterior suceda sea el mínimo. La relación ideal entre estos dos términos nos la da el ciclo de Carnot invertido y se representa mediante lo que se conoce como el coeficiente de realización (β) que en forma general se define como la relación entre la energía solicitada (retirar Q_b) y la energía que nos cuesta (W), de manera que:

$$\beta = \frac{\text{Energía solicitada}}{\text{Energía que cuesta}} = \frac{Q_b}{W} \quad ($$

pero si hacemos un balance energético sencillo de la máquina térmica tenemos:

$$W = Q_a - Q_b \quad (13.2)$$

y entonces,

$$\beta = \frac{Q_b}{Q_a - Q_b} = \frac{1}{\frac{Q_a}{Q_b} - 1} \quad (13.3)$$

temperaturas,

$$\beta = \frac{T_a}{T_a - T_b} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_b} - 1} \quad (13.4)$$

Note que conociendo las temperaturas de la fuente y el sumidero, que se miden mucho más fácil que los calores, podemos determinar el coeficiente de realización máximo (ideal) según Carnot.



Figura 13.1. Diagrama representativo de una máquina frigorífica (MF).

Como ya se mencionó, la mayoría de los sistemas de enfriamiento que se utilizan en la actualidad se basan en la evaporación de un líquido a baja presión. Un diagrama del refrigerador más simple de este tipo se presenta en la figura 13.2. Al dejar escapar el líquido refrigerante del recipiente que lo contiene, pasa de una presión alta a la presión atmosférica. A la presión y temperatura ambiente, por características propias del fluido refrigerante, éste no puede existir en estado líquido y forzosamente tiene que pasar al estado gaseoso. El calor requerido para que se de este cambio de fase (calor de vaporización) se toma de los alrededores con que está en contacto el fluido refrigerante (recipiente y medio ambiente) de manera que estos serán enfriados.

Desde luego, trabajar con un sistema abierto donde el refrigerante, que puede ser costoso y tóxico, se pierda al pasar directamente a la atmósfera, no es lo más conveniente; y lo normal es trabajar con ciclos de refrigeración. Cualquier ciclo de refrigeración necesita energía para su funcionamiento. Esta energía puede ser suministrada de diversas maneras según el sistema de refrigeración de que se trate. Si es un ciclo de refrigeración por compresión lo normal es suministrar esta energía en forma de trabajo mecánico a través de un compresor, pero si se trata de un sistema de refrigeración por absorción, la energía se suministra en forma de calor. Este calor puede provenir de la quema de algún combustible (gas, diesel, gasolina, carbón, leña), de alguna reacción química o directamente del sol. Hasta hace algunos años era muy frecuente encontrar refrigeradores por absorción con mezclas de amoníaco-agua-hidrógeno ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2$) que operaban con gas LP. El utilizar la energía solar como medio de suministrar el calor a un sistema de refrigeración por absorción es algo novedoso que se ha venido dando y desarrollando durante los últimos años y que puede convertirse en una de las aplicaciones más importantes de la energía solar, si es que se logran desarrollar sistemas prácticos, sencillos, seguros y de costo no muy elevado.

Un diagrama general de un sistema que opera con un ciclo de refrigeración continuo se presenta en la figura 13.3. Este consta de una parte donde se suministra el trabajo mecánico o el calor según lo visto arriba, además del condensador, evaporador y válvula de expansión comunes a ambos ciclos de refrigeración que operan de manera continua.



Figura 13.2. Diagrama del refrigerador más simple basado en la evaporación de un líquido a baja presión.

Figura 13.3. Diagrama general de un ciclo de refrigeración continuo.

A continuación se da una breve explicación de cada uno de los procesos que tienen lugar en el ciclo:

- 1-2 **Compresión.** La forma de como se logra, depende del tipo de sistema y básicamente ésta es la diferencia fundamental entre un sistema de refrigeración por compresión y uno por absorción. Lo que en el primero se logra fácilmente, aunque no sea lo más económico, mediante la aplicación de un trabajo (**W**) por medio de un compresor eléctrico, en el segundo se da mediante la aplicación de un calor en el generador (**Q_G**) bajo diversas condiciones que analizaremos más adelante.
- 2-3 **Enfriamiento y condensación.** A presión alta y constante, el vapor se transforma en líquido saturado, desprendiendo el calor latente "**Q_a**" o calor cedido por el condensador (**Q_C**).
- 3-4 **Expansión.** Mediante una válvula reguladora de presión pasamos el líquido saturado de la región de alta presión hacia otra de baja presión.
- 4-1 **Evaporación.** El líquido a presión baja y constante se evapora y con esto se cierra el ciclo. Es aquí donde se da el efecto de enfriamiento cuando el fluido refrigerante absorbe el calor latente "**Q_b**" que pierden los alrededores o calor que absorbe el evaporador (**Q_E**).

Un diagrama presión volumen (**P-V**) y otro temperatura entropía (**T-S**) suponiendo que la compresión del paso 1-2 es adiabática para ambos sistemas se muestra en la figura 13.4.

1. Fluidos refrigerantes.

Los fluidos refrigerantes deben de cumplir ciertas características para que puedan ser utilizados como tales. A continuación se da una lista de las más importantes:

1. Bajo punto de ebullición normal. Con esto se evita que el sistema tenga que operar al vacío con la posibilidad de que le entre aire.
2. Presión de condensación no excesiva. Para no tener que utilizar instalaciones extrafuertes.



Figura 13.4. Diagrama P-V y T-S para un ciclo continuo de refrigeración.

3. Temperatura crítica alta. Esto permite que el refrigerante sea condensable en las condiciones de operación del sistema. Se recomiendan Temperaturas críticas arriba de los 100 °C.
4. Calor latente de vaporización alto. Entre más alto sea este valor, menos flujo de refrigerante se necesita circular por unidad de tiempo para tener la misma capacidad.
5. Calor específico del líquido bajo. De alguna manera el líquido tiene que ser enfriado antes de evaporarse. Esto es a expensas de la vaporización del mismo.
6. No corrosivo.
7. Estable químicamente.
8. No inflamable y no explosivo.
9. No tóxico. Tanto para pulmones, ojos y en general a la salud.
10. Indicador de fugas. Que el refrigerante sea tal que una fuga se pueda detectar fácilmente.
11. No afecte a los lubricantes utilizados.
12. Transferencia de calor satisfactoria.
13. Punto de congelación bajo. Abajo de la temperatura a la cual va a trabajar el evaporador.
14. Disponibilidad, bajo costo y fácil de manejar.

No todos los refrigerantes tienen todas las características mencionadas, pero deberá tener las máximas posibles.

En la tabla 13.1 se da una lista de los refrigerantes mas utilizados así como algunas de sus características.

13.3 REFRIGERACION POR ABSORCION.

En un sistema de refrigeración por absorción se trabaja generalmente con mezclas de 2 componentes en donde uno es el fluido refrigerante y el otro simplemente sirve como medio de absorción del

fluido refrigerante.

Se han estudiado diversas mezclas de componentes. Por ejemplo, se han estudiado diversos medios de absorción para el amoníaco que tiene excelentes propiedades como refrigerante. Entre los medios de absorción estudiados se encuentran el nitrato de amonio, el nitrato de litio, los haluros alcalinos y los tiocianatos de sodio y litio; aunque el medio de absorción por excelencia es el agua. También la mezcla de bromuro de litio agua ha sido muy estudiada.

Tabla 13.1. Fluidos refrigerantes más utilizados.				
Nombre ASRE	Nombre químico	Fórmula	Peso molecular	Punto de ebullición
11	Tricloromono-fluorometano	CCL_3F	137.4	23.7 °C
12	Diclorodifluoro metano	CCL_2F_2	120.9	-29.7 °C
114	Diclorotetra-fluoroetano	$(\text{CCLF}_2)_2$	170.9	3.5 °C
717	Amoníaco	NH_3	17.0	-33.3 °C
718	Agua	H_2O	18.0	100.0 °C
744	Dióxido de carbono	CO_2	44.0	-78.3 °C (subl.)

1. Sistema de refrigeración continua por absorción.

Un diagrama de un refrigerador por absorción continuo se muestra en la figura 13.5. La función del condensador, válvula de expansión y evaporador es idéntica a la que se da en el ciclo de refrigeración por compresión. Como ya se mencionó, la diferencia está en el modo de lograr la presurización del fluido refrigerante. En este caso, primero se disuelve el refrigerante en un líquido absorbente dentro del absorbedor (2-3). Luego, la solución concentrada pasa hacia la región de alta presión mediante el uso de una bomba ordinaria (3-4), donde finalmente el refrigerante es separado de la solución por medio de la adición de calor en el generador (Q_G) (4-5). La solución diluida (4-7) regresa al absorbedor a través de una válvula (7-8) que controla la diferencia de presiones entre el generador (presión alta) y el absorbedor (presión baja). La reacción de absorción que se da en el absorbedor es exotérmica y por lo tanto ahí se libera un calor (Q_A) hacia el medio ambiente.

Suponiendo que el trabajo de la bomba (W_P) es despreciable, el coeficiente de realización (B) comúnmente conocido también como coeficiente de funcionamiento o coeficiente de rendimiento (**COP** o **COR**), dado por la **ecuación 1** queda definido como la relación entre el calor absorbido por el fluido refrigerante al evaporarse (Q_E) y el calor suministrado en el generador, Q_G . De este modo:

$$\mathbf{b} = (COP) = (COR) = \frac{Q_E}{Q_G} \quad \mathbf{(13.5)}$$



Figura 13.5. Diagrama de un ciclo de refrigeración continuo por absorción.

13.4 REFRIGERACION SOLAR.

1. Sistema de refrigeración solar continuo.

Se mencionó ya que los sistemas que más acoplan para utilizar la energía solar como fuente de energía son los sistemas de refrigeración por absorción. En la figura 13.6 se muestra un diagrama de un ciclo de refrigeración solar continuo. La característica de un refrigerador solar es que el calor suministrado en el generador (Q_G), ahora viene de la energía solar (Q_i) a través de un campo de colectores solares en donde se calienta algún fluido de trabajo que posteriormente mediante intercambiadores de calor cede el calor solar en el generador. Cabe hacer notar que en

este caso el **calentamiento solar es indirecto** y que debido a la intermitencia propia del sol, se requiere de un **sistema de almacenamiento** y de una **fuentes auxiliar** extra para que el sistema funcione continuamente. Las mezclas más utilizadas en este tipo de sistemas son la de **amoniac-agua** y **bromuro de litio-agua**.



Figura 13.6. Diagrama de un ciclo de refrigeración solar continuo.

Sistema amoniaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). En este caso el refrigerante es el amoniaco y el absorbente es el agua. La temperatura que se requiere en el generador para lograr separar el amoniaco de la solución concentrada es del orden de los 120-150 °C, factibles de alcanzar con colectores solares planos. Debido al bajo punto de ebullición normal del amoniaco (-33.3 °C) y a su gran calor de vaporización (327 cal/g), en el evaporador se pueden obtener temperaturas abajo de 0 °C. En general estos sistemas se utilizan para la conservación de productos perecederos como alimentos y medicinas, y para la producción de hielo. Una desventaja del amoniaco es que es tóxico y que ataca metales como el fierro galvanizado y cobre, de manera que el equipo que esté en contacto con él debe ser de fierro al carbón o algún otro material resistente al amoniaco. El equipo también debe estar construido para soportar las grandes presiones que se generan con los

vapores del amoníaco (hasta de 15 kg/cm²).

Sistema bromuro de litio-agua (BrLi-H₂O). Esta mezcla se utiliza mucho en los sistemas de aire acondicionado y por lo tanto su principal uso es en el acondicionamiento calorífico de viviendas y edificios. Las temperaturas que se pueden obtener en el evaporador no pueden estar abajo de los 4 °C debido a que en este caso el fluido refrigerante es el agua y el absorbente el bromuro de litio. El punto de ebullición normal del agua es de 100 °C y su calor de vaporización de 540 cal/g. Las temperaturas requeridas en el generador para separar el agua de la solución concentrada son de alrededor de los 100 °C, por lo que el uso de colectores planos se da sin ningún problema.

2. Sistema de refrigeración solar intermitente.

Un diagrama de un refrigerador solar intermitente muy sencillo que nos sirve sólo para explicar de manera simple los pasos y procesos que se dan en un sistema de este tipo se muestra en la figura 13.7. Consta de dos recipientes interconectados entre sí por medio de una válvula, donde cada uno de ellos juega una doble función. El primero como **generador-absorbedor** y el segundo como **condensador- evaporador**. El funcionamiento lo podemos dividir en dos etapas: la etapa de generación y la de enfriamiento.

En la etapa de generación, el recipiente que en este caso sirve como **generador**, inicialmente contiene una solución acuosa concentrada de amoníaco. Esta es calentada con energía solar de manera que se genera o produce vapor de amoníaco que después de pasar por la válvula se condensa en el otro recipiente que en esta etapa sirve como **condensador**. Aquí hay que retirar el calor de condensación del amoníaco (327 cal/g) enfriando por medio de aire o agua para lograr tenerlo en estado líquido y a una alta presión.



Figura 13.7. Diagrama del refrigerador solar intermitente más sencillo.

Esta etapa se lleva a cabo mientras el flujo de energía solar es suficiente para seguir

generando vapor de amoníaco. Hay que tener en cuenta que a medida que pasan las horas de sol la solución inicialmente concentrada se torna una solución débil y por lo mismo es más difícil seguir generando amoníaco.

Una vez terminada la etapa de generación se cierra la válvula intermedia y se deja enfriar el primer recipiente que ahora contiene una solución débil de amoníaco y una baja presión. En el condensador queda almacenado amoníaco líquido a alta presión listo para usarse en la etapa de enfriamiento.

En esta etapa se vuelve a abrir la válvula intermedia. Al comunicar de nuevo los dos recipientes, la presión del sistema completo baja lo suficiente para que el amoníaco no pueda existir en estado líquido y por lo tanto forzosamente tiene que pasar al estado gaseoso. Esto se hace en el segundo recipiente que ahora sirve como **evaporador**. El amoníaco absorbe calor de los alrededores para pasar de líquido a vapor y por lo tanto es aquí donde se tiene el efecto de refrigeración.

El vapor de amoníaco pasa al primer recipiente y se absorbe en la solución diluida de amoníaco. Este recipiente ahora tiene la función de **absorbedor**. Aquí hay que retirar el calor que se genera por la absorción para evitar que se incremente la temperatura y se dificulte la absorción que afectaría el funcionamiento del sistema completo. Con esto se completan las dos etapas del ciclo intermitente de refrigeración, y el sistema queda listo para iniciar un nuevo ciclo cuando vuelva a haber flujo de energía radiante.

Desde luego, un sistema real no es tan sencillo como lo anterior, hay que tener cuidado especial sobre todo en el diseño del colector de energía solar que contendrá la solución de amoníaco a evaporar y en las interconexiones entre el **colector(generator)-absorbedor** y el **condensador-evaporador**.

Descripción del refrigerador solar desarrollado en iteso. En la figura 13.8 se muestra una fotografía y un diagrama del refrigerador solar intermitente. Este consta de un colector plano de 3 m² de área de colección (3). Este hace las veces de generador y absorbedor, está construido con tubo de fierro negro de diversos diámetros y placa de fierro soldada a dichos tubos. Algunos tubos (parte superior y centro (4)) son de un diámetro bastante grande (20 y 10 cm) y permiten por un lado almacenar un cantidad importante de la solución concentrada de amoníaco que se va a evaporar, así como propiciar que se haga una separación eficiente entre el vapor de amoníaco y la solución. Todo el colector se encuentra dentro de un cajón (5) que tiene una doble cubierta de vidrio (1 y 2).

El amoníaco generado durante el día pasa a través de la válvula (8) al condensador-evaporador (6) que está dentro de una chaqueta (7) donde se hace circular agua de enfriamiento durante el día (etapa de generación) y se pone el agua que se quiere convertir en hielo o enfriar durante la noche (etapa de enfriamiento). Las otras válvulas deben permanecer cerradas en la etapa de generación.

El condensador-evaporador (6) debe estar construido para soportar las altas presiones que genera el amoníaco durante la etapa de generación (6 a 15 kg/cm²).

La válvula (9) se utiliza durante la etapa de enfriamiento y permite al amoníaco que se evapora y produce hielo o enfriamiento en el agua que se pone en la chaqueta que rodea al evaporador, pasar a la parte baja del colector para volver a absorberse en la solución débil que quedó en el colector.

La válvula (10) se utiliza ocasionalmente cuando algo de agua a sido arrastrada por el vapor de amoníaco y ha pasado al condensador-evaporador. Para evitar lo más posible este

efecto, se pone un rectificador entre la salida del amoniaco generado y la entrada al condensador.

El funcionamiento tanto en la etapa de generación como en la de enfriamiento es similar a lo explicado arriba para el diagrama de la figura 13.7.

En la figura 13.9 se muestra una gráfica típica del funcionamiento del refrigerador solar intermitente. Se grafican datos de presión del sistema, temperatura de la placa y del cabezal superior o domo de vapor, temperatura ambiente, insolación y volumen de amoniaco generado, para la etapa de **generación-condensación**; y temperatura del evaporador, temperatura del cabezal superior y presión del sistema, durante la etapa de **evaporación-absorción**.

En la figura 13.10 se muestran algunas fotos de los hielos obtenidos 100 % con energía solar. Se lograron producir hasta 7 kg de hielo por día con el sistema mencionado.

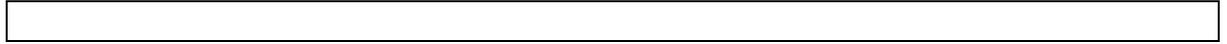


Figura 13.8. (a) Foto del refrigerador solar intermitente desarrollado en el iteso. (b) Esquema representativo.



Figura 13.9. Gráfica típica del funcionamiento del refrigerador solar intermitente desarrollado en el ITESO.



Figura 13.10. Fotos de los hielos obtenidos en el ITESO, 100% con energía solar.

APENDICE A

**MODELO MATEMATICO PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE
PERDIDAS DE CALOR POR LA PARTE SUPERIOR DE UN COLECTOR
SOLAR.**

Este modelo matemático se utiliza para calcular el valor de las primeras tres resistencias (ver figura 5.4) y consecuentemente el valor del coeficiente de pérdidas de calor por la parte superior del colector, U_t . El modelo matemático explícito, considera que las pérdidas de calor por la parte superior, son el resultado de la convección y radiación entre dos placas paralelas con una inclinación de 45° .

Se supone que la energía transferida desde la placa colectora a T_p , hacia los alrededores a T_a ($q_{l,p-a}$), es la misma que se transfiere entre la placa y la primera cubierta a T_{c1} ($q_{l,p-c1}$), la misma que se transfiere entre las dos cubiertas ($q_{l,c1-c2}$) y también la que finalmente se transfiere hacia los alrededores a través de la segunda cubierta ($q_{l,c2-a}$).

Mediante un análisis que no expondremos en esta parte, tenemos que el calor transferido por unidad de área, desde la placa absorbidora a la primera cubierta ($q_{l,p-c1}$), es igual a

$$q_{l,p-c1} = h_{p-c1}(T_p - T_{c1}) + \frac{\mathcal{S}(T_p^4 - T_c I^4)}{\frac{1}{e_p} + \frac{1}{e_c} - 1} \quad (\text{A.1})$$

donde h_{p-c1} es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa absorbidora y la primer cubierta, \hat{a}_p la emitancia infrarroja de la placa, \hat{a}_c la emitancia infrarroja de la cubierta interior y σ la constante de radiación de Stefan-Boltzmann ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

Alternativamente, podemos reordenar la ecuación anterior de manera que tenga una forma similar a la ecuación general de pérdidas de calor (5.4). así,

$$q_{l,t} = (h_{p-c1} + h_{r,p-c1})(T_p - T_c I) \quad (\text{A.2})$$

donde por analogía con la ecuación (5.4) y sabiendo que cualquier resistencia es igual al inverso de su coeficiente, conocemos R_3 ,

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (\text{A.3})$$

donde, para placas paralelas con una inclinación de 45° ,

$$h_{p-c1} = 1 - 0.018(T_m - 10) \left(1.14 \frac{\Delta T^{0.310}}{L^{0.070}} \right) \quad (\text{A.4})$$

y

$$h_{r,p-c1} = \frac{\mathcal{S}(T_p + T_c I)(T_p^2 + T_c I^2)}{\frac{1}{e_p} + \frac{1}{e_c} - 1} \quad (\text{A.5})$$

En la ecuación (A.4), T_m es la temperatura media entre las dos placas paralelas, que para este caso son la placa absorbidora y la primer cubierta de vidrio y L la distancia entre las mismas, en

centímetros.

Una manera de aumentar el valor de R_3 y por lo tanto disminuir el valor de $h_{r,p-c1}$, es haciendo que la α_p adquiera valores pequeños y esto se puede lograr utilizando superficies selectivas sobre la cubierta absorbedora. Una superficie selectiva tiene la propiedad de tener altas absorptancias en el rango de longitudes de onda de la radiación solar, y bajas emitancias en el rango de longitudes de onda de la radiación infrarroja.

Haciendo un análisis semejante para R_2 y tomando los datos correspondientes al par de placas paralelas que se están analizando, las dos cubiertas de vidrio, encontramos que,

$$R_2 = \frac{1}{h_{c1-c2} + h_{r,c1-c2}} \quad (\text{A.6})$$

donde $c2$ se refiere a la segunda cubierta y T_m y L de las ecuaciones (A.4) y (A.5), ahora se referirán a la temperatura media entre las dos cubiertas y al espacio entre las mismas, respectivamente.

Para obtener R_1 , se hace un análisis semejante al anterior, sólo que en este caso, el coeficiente de transferencia de calor por convección es debido al aire soplando sobre la segunda cubierta y ahora se denominará h_w . Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor por radiación ($h_{r,c2-a}$), toma en cuenta que las pérdidas por radiación se dan entre la segunda cubierta y el firmamento que se encuentra a T_s , y no entre dos placas paralelas. Por conveniencia, este último coeficiente se refiere también a la temperatura ambiente T_a . Así,

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \quad (\text{A.7})$$

donde

$$h_{r,c2-a} = e_c \frac{S(T_c^2 + T_s^2)(T_c^2 - T_s^2)}{T_c^2 - T_a} \quad (\text{A.8})$$

y v de la ecuación (A.8), es la velocidad del viento (m/s).

Existen varios modelos para poder evaluar la temperatura equivalente del firmamento, T_s , aunque si se supone igual a la ambiente, no se afecta mucho el valor de U_t . De cualquier manera, a continuación se presentan dos modelos en una misma ecuación, que quedan en función de T_a

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} = T_a - 6 \quad (\text{A.10})$$

Una vez que se conocen las tres primeras resistencias, podemos sustituir su valor en la ecuación (5.9) y obtener U_t ,

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{p-c1} + h_{r,p-c1}} + \frac{1}{h_{c1-c2} + h_{r,c1-c2}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (\text{A.11})$$

Nótese que este análisis es para placas paralelas que tienen un ángulo de inclinación de 45°. Si las placas no están a 45° de inclinación, se tiene que hacer un ajuste de manera que U_t para cualquier ángulo s , se representa por la ecuación siguiente:

$$\frac{U_t}{U_{t,45^\circ}} = 1 - (s - 45)(0.00259 - 0.00144 e_p) \quad (\text{A.12})$$

Debido a que la temperatura de las cubiertas de vidrio no es conocida, el procedimiento a seguir es suponer primero una temperatura para dichas cubiertas y con estas calcular U_t . Después, sabiendo que el calor transferido de la placa al vidrio, es igual al calor disipado por la placa hacia los alrededores, como lo habíamos mencionado anteriormente, podemos encontrar una ecuación que calcula la temperatura de las cubiertas. Así, para la primer cubierta tenemos

$$T_c I = T_p - \frac{U_t (T_p - T_a)}{h_{p-cl} + h_{r,p-cl}} \quad (\text{A.13})$$

Algo similar sucede con la segunda o demás cubiertas.

Después, la temperatura calculada se compara con la supuesta para ver su semejanza. Lo ideal es ahora utilizar esa temperatura calculada e iniciar nuevamente el cálculo de U_t , hasta que la temperatura supuesta y calculada sean semejantes, sobre todo cuando hay mucha diferencia entre la primer temperatura supuesta y la calculada. De esta manera pues, mediante iteraciones, se logra obtener el valor correcto de U_t .

Como vemos, calcular el valor del coeficiente total de pérdidas de calor (U_L) y sobre todo U_t , es bastante complicado, pero a la vez, de suma importancia, ya que es un factor que nos relaciona directamente las pérdidas totales del colector.

Ejemplo A.5.1

Calcular el coeficiente total de pérdidas de calor, U_L , utilizando el modelo matemático expuesto, para un colector plano con una sola cubierta de vidrio, que mide 1.20 m de largo por 0.70 m de ancho y que tiene las siguientes características:

Emitancia de la placa de absorción (pintura negra)	0.90
Emitancia del vidrio en el infrarrojo	0.88
Temperatura promedio de la placa de absorción	60 °C
Temperatura del aire ambiente y del firmamento	25 °C
Velocidad del viento	1 m/s
Espaciamiento entre la placa absorbidora y el vidrio	2.5 cm
Angulo de inclinación del colector	45°
Altura del colector	6 cm
Espesor del aislante por el fondo y lados	2.5 cm
Conductividad térmica del aislante	0.04 W/mK

Solución

Como primer paso, se supondrá que la temperatura del vidrio es igual a 40 °C. Las temperaturas se manejan en K ($K = 273 + \text{°C}$), entonces, de la ecuación (A.5)

$$h_{r,p-cl} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{e_p} + \frac{1}{e_c} - 1}$$
$$= \frac{(5.67 \times 10^{-8})(333 + 313)(333^2 + 313^2)}{\frac{1}{0.9} + \frac{1}{0.88} - 1}$$
$$= 6.13 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Debido a que en este caso $T_a = T_s$, la ecuación (A.9) queda como,

$$\begin{aligned}
 h_{r,c2-a} &= \epsilon_c \sigma (\bar{T}_c^2 + \bar{T}_s)(\bar{T}_c^2 + \bar{T}_s^2) \\
 h_{p-cl} &= [1 - 0.018(50 - 10)] 1.14 \frac{(20)^{0.310}}{2.5^{0.070}} = 2.51 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\
 &= 5.67 \times 10^{-8} (0.88)(313 + 298)(313^2 + 298^2) \quad (\text{A.8})
 \end{aligned}$$

Por otra parte, según la ecuación (A.4),

$$\begin{aligned}
 h_w &= 5.7 + 3.8(1) = 9.50 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\
 &= 5.69 \text{ W/m}^2 \text{ K}
 \end{aligned}$$

similarmente, según la ecuación

Entonces según la ecuación (A.11) y considerando solo una cubierta de vidrio, tenemos

$$U_i = \left(\frac{1}{h_{p-cl} + h_{r,p-cl}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{1}{2.51 + 6.13} + \frac{1}{9.50 + 5.69} \right)^{-1}$$

Por otro lado, se tiene que verificar que la temperatura supuesta en el vidrio es la adecuada. Así,

$$T_c I = T_p - \frac{5.51 \text{ W/m}^2 \text{ K}}{h_{p-cl} + h_{r,p-cl}} = 60 - \frac{5.51(60 - 25)}{2.51 + 6.13} = 37.68^\circ \text{C}$$

Si se emplea esta temperatura en una siguiente iteración, se obtiene que,

$$\mathbf{h_{r,p-cl}} = 6.07 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\mathbf{h_{r,c-a}} = 5.63 \text{ "}$$

$$\mathbf{h_{p-cl}} = 2.60 \text{ "}$$

$$\mathbf{h_w} = 9.50 \text{ "}$$

$$\mathbf{U_i} = 5.51 \text{ "}$$

y el nuevo valor de $\mathbf{T_{cl}}$ que se obtiene con estos valores es $\mathbf{T_{cl}} = 37.76$, por lo que se supone que el segundo valor supuesto es el correcto.

Ahora, según las ecuaciones (5.11) y (5.12),

$$U_b = \frac{k_a}{l} = \frac{0.04}{0.0254} = 1.57 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

y

$$U_e = \frac{k_a M P}{l' A_c} = \frac{(0.04)(0.06)(3.80)}{(0.0254)(0.84)} = 0.43 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Finalmente, tenemos que

$$U_L = U_i + U_b + U_e = 5.51 + 1.57 + 0.43 = 7.51 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Como se puede observar, este valor es solo ligeramente superior al que se calculó anteriormente.

APENDICE B

**GRAFICAS PARA CALCULAR U_t ,
PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION DEL COLECTOR
SOLAR PLANO**

Para simplificar el cálculo del funcionamiento del colector solar plano, se prepararon las figuras de este apéndice de la 5.6.a a la 5.6.f, de donde podemos obtener U_t para las siguientes condiciones:

- 1.- Para una, dos o tres cubiertas de vidrio separadas a 2.5 cm unas de las otras.
- 2.- Para temperaturas del aire ambiente de 40, 10 y -20 °C.
- 3.- Para coeficientes de transferencia de calor debidos al viento (h_w) de 5, 10 y 20 W/m²°C.
- 4.- Para placas absorbedoras con una emitancia (α_p) de 0.95 y 0.10.
- 5.- Para un rango de temperaturas medias de la placa ($T_{p,m}$) entre 0 y 200 °C.
- 6.- Para placas paralelas con una inclinación de 45°.

APENCIDE C

GRAFICAS DE RADIACION SOLAR

APENCIDE D

HOJAS DE ESPECIFICACIONES PARA PIRANÓMETROS COMERCIALES

BIBLIOGRAFÍA:

1. Manrique, José A. Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. Ed. Harla, 1984.
2. Daniels, Farrington. Uso Directo de la Energía Solar. Herman Blume Ediciones.
3. Duffie, John A. y Beckman, William A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley Interscience, 1980.
4. Meinel y Meinel. Solar Energy. Addison Wesley.
5. Hermosillo, Juan Jorge. Destilación Solar. Cuaderno Huella #16, ITESO.
6. Gudiño Ayala, David. Calibración de Piranómetros. Reporte de Proyecto No. 22, Unidad Académica de Tecnología Intermedia, ITESO.
7. Apuntes del curso de actualización. Secado Solar. ANES 1993.