

Jaime A. Moragues

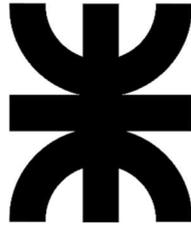
Alfredo T. Rapallini

COLECTORES PLANOS Y CONCENTRADORES DE RADIACIÓN SOLAR



edUTecNe





**COLECTORES PLANOS
Y
CONCENTRADORES DE RADIACIÓN SOLAR**

**Jaime A. Moragues
Alfredo T. Rapallini**

edUTecNe

Buenos Aires, 2021

Moragues, Jaime A.

Colectores planos y concentradores de radiación solar / Jaime A. Moragues; Alfredo T. Rapallini; editado por Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2021.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4998-78-1

1. Energía Renovable. 2. Energía Solar. 3. Radiación Solar. I. Rapallini, Alfredo T. II., Jaime A. Moragues, III Cejas, Fernando, IV. Título.

CDD 621.47

Corrección de estilo: Laura María Motta Lima

Ilustraciones y gráficos: Joaquín Marcos Arrossi

Diseño interior y tapas: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Héctor Eduardo Aiassa

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaria Académica: Ing. Liliana Raquel Cuenca Pletsch



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando H. Cejas

Director Colección Energías Renovables, Uso Racional de Energía, Ambiente: Jaime A. Moragues.

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2021

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina



Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.



Introducción

Radiación térmica. Fórmulas fundamentales

Origen de la radiación solar y su composición espectral

Conversión fototérmica de la energía solar

Colectores solares planos

Análisis térmico y eficiencia

Sistema colector-termotanque

Concentradores de radiación solar

Descripción de los diferentes tipos de concentradores

Anexo

Acerca de los autores

La generación de energía térmica a partir de la radiación solar tiene un amplio rango de aplicaciones. Se puede obtener temperaturas bajas para calentamiento de agua sanitaria o calefacción de edificios con colectores planos, y, con un principio similar, destilación de agua y secado de diversos productos.

Así mismo, con concentradores económicos y de baja eficiencia se dispone de cocinas solares. Se logran temperaturas medias y altas para usos industriales, tanto con colectores planos especiales como con concentradores. Y se alcanzan temperaturas altas para la generación de electricidad, ya sea empleando el vapor generado en turbinas convencionales o con motores Stirling.

Es posible obtener muy alta temperatura con combinación de concentradores, como por ejemplo el caso particular del horno solar de Odeillo, que alcanza los 3.400 °C.

En muchas de las aplicaciones mencionadas, dada la intermitencia de la energía solar, se necesita acumulación de energía térmica, cuya forma depende de la temperatura alcanzada.

En este libro no se va a discutir las diferentes aplicaciones ^[1], sino que se analiza en detalle el funcionamiento de los colectores planos y los concentradores, y se darán ejemplos de estos.

A tal fin se discuten primero las propiedades de la radiación electromagnética y sus leyes fundamentales (de Planck, de Wien y de Stefan Boltzman), el origen de la radiación solar y su composición espectral, y el proceso de conversión fototérmica de la misma.

Se ve en detalle los colectores de placa plana y más en general los sin cubierta, los estanques playos, planos con concentración y de tubo de vacío, así como el funcionamiento térmico y eficiencia de los mismos y del conjunto colectores-termotanque.

Se describen diferentes tipos de concentradores, tales como parabólico compuesto, lentes de Fresnel, fijo a espejo facetado, de múltiples espejos cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un plano o un cilindro, cilíndrico parabólico, fijo semiesférico, a torre central y paraboloide de revolución, así como el grado de concentración de cada uno, las temperaturas alcanzadas y sus eficiencias.

[1] Un panorama de las aplicaciones se puede tener en “Conversión fototérmica de la energía solar”, C. A. Cárdenas, M. Condori, J. Franco, J.A. Moragues y L. R. Saravia. Editado por la editorial de la Universidad Tecnológica Nacional- edUTecNe. 2017.

El presente libro se basa en numerosos trabajos, publicaciones y cursos realizados por los autores a lo largo de 30 años.

En particular quiero agradecer a Alfredo Rapallini por la amistad y el apoyo recibidos a lo largo de esos años. Lamentablemente Rapallini ha fallecido en 2011 y no tendrá la satisfacción de ver este proyecto concluido.

Así mismo agradezco a mi nieto Joaquín Marcos Arrossi, quien hizo la mayoría de las figuras, dado que sin su aporte hubiera sido difícil su publicación; a Rubén Nicolás, un gran amigo, por la discusión del contenido técnico del libro y a mi esposa Laura María Motta Lima, por el apoyo recibido y la revisión de la sintaxis.

Jaime A. Moragues

Si bien la energía no es una necesidad básica para el ser humano como el aire, el agua y los alimentos, es un componente esencial para lograr la satisfacción de aquellas y ha estado siempre directamente vinculada con las grandes *revoluciones de la Humanidad*.

Las dos revoluciones iniciales fueron lentas en su accionar. La primera estuvo caracterizada por el control del fuego, hace quinientos mil años, como muestra lo encontrado en las cuevas del hombre de Pekín y de Java, que permitió al ancestro del Homo Sapiens ampliar la superficie habitable al posibilitar un control rudimentario del clima, e hizo digeribles muchos alimentos no aprovechables en su estado natural. Así, el empleo de biomasa para producir energía térmica fue la primera gran revolución energética.

La segunda se produce cuando el predador nómada del paleolítico, ante el peligro de la escasez y la destrucción, por el saqueo, de sus fuentes naturales de subsistencia, inició hace 10.000 años una primitiva agricultura que fue incrementada por la utilización de animales de carga, que centuplicaron el rendimiento de los campos, convirtiéndose entonces en agricultor y pastor. Fue así consciente del empleo de dos fuentes de energía externas, la importancia de la energía solar para sus cultivos y el uso de la energía mecánica aportada por lo animales.

Hasta final del siglo XVIII la energía térmica era provista por la leña, los desechos agrícolas y de animales y, a partir del 1400, por el carbón, mientras que el trabajo mecánico era producido por el hombre, los animales, los molinos de viento y las ruedas hidráulicas, también conocidas como norias.

Ya en nuestra era, la tercera gran revolución, la denominada industrial, que podemos ubicar cuando James Watt patentó su máquina a vapor (1769), fue producto de haber logrado la conversión de la energía térmica a mecánica, lo que cambió los sistemas productivos e inició un desarrollo que sigue en progreso constante hasta nuestros días. Comenzó con el empleo de leña y carbón, y se multiplicó con el descubrimiento del petróleo (1860). Se considera como “primera etapa” de la Revolución Industrial la que va hasta la introducción de la energía eléctrica, o sea entre 1870, cuando Zénobe-Théophile Gramme construyó la primera máquina de corriente continua denominada dínamo, y 1887, cuando Nikola Tesla logró su motor de inducción de corriente alterna. A partir de ahí se inicia la “segunda etapa”, que se sumó e intensificó a la anterior, abriéndose campos nuevos y sustituyendo con electricidad otras formas de energía en diversos procesos. A finales del siglo XIX, la energía hidráulica se convirtió en una fuente para generar electricidad y desde 1951, cuando el Laboratorio Nacional de Argonne la produjo por primera vez, la energía nuclear contribuyó también a esa generación. La electrificación no sólo fue un proceso técnico, sino un verdadero cambio social de implicaciones extraordinarias, comenzando por el alumbrado y siguiendo por todo tipo de procesos industriales, transporte, calefacción, cocción y comunicaciones.

La cuarta revolución, que estamos viviendo, se inició al incrementarse enormemente en 1973 el precio del petróleo, generando una crisis energética que, si bien fue evidente que se trataba de una cuestión compleja, de la cual el factor petrolífero desencadenante sólo era un aspecto parcial, hizo ver a los países industrializados la necesidad de desarrollar nuevas alternativas, en particular las renovables. En 1978 se produjo un nuevo aumento de este combustible, que incentivó más los programas de desarrollo de las tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Luego de entrar en un cono de sombra a mitad de la década del 80, con la caída del precio del petróleo, estas formas de energía volvieron a surgir, y ahora para quedarse, cuando, a partir de la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, conocida como ECO 92 o Cumbre de la Tierra, realizada en 1992 en Río de Janeiro, 20 años después de la primera Conferencia Mundial sobre Medio Ambiente Humano, realizada en Estocolmo, la sociedad empezó a tomar conciencia de los problemas de contaminación ambiental que producen los hidrocarburos.

Además, el desarrollo de las tecnologías desde la década del 90 hizo que el empleo de las fuentes renovables, que no eran competitivas desde el punto de vista económico, hoy ya lo sean.

Esta nueva revolución está cambiando las costumbres de la sociedad, a medida que se van concretando los nuevos paradigmas energéticos basados en energías renovables, su uso descentralizado, racional y eficiente y la conservación del ambiente.

1.1. FUENTE DE ENERGÍA

Las diversas fuentes de energía que el ser humano dispone, tienen básicamente cuatro orígenes: el Sol, la Tierra, el mar y la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol.

La radiación solar que llega a nuestro planeta, es colectada y convertida en otras formas de energía por el gran sistema termodinámico que integran la Tierra y su atmósfera.

La materia orgánica se produce a partir de la energía solar por efecto de la fotosíntesis. Si usada a corto plazo, es llamada de bioenergía; su descomposición y el efecto de grandes presiones, por millones de años, han dado origen al petróleo, gas y carbón.

La evaporación de las aguas de ríos, lagos y océanos por acción de la radiación solar, con formación de nubes llevadas por el viento; la precipitación en forma de lluvia o nieve y, finalmente, el escurrimiento hacia regiones más bajas, por medio de la gravedad terrestre, dan origen a la energía hidráulica.

El calentamiento distinto de la atmósfera origina los vientos (energía eólica) y éstos las olas, cuyas altura y movimiento se puede aprovechar para generar energía.

La diferencia de temperatura entre las aguas superficiales calentadas por el Sol y las aguas profundas, genera un gradiente térmico que permite producir electricidad.

También se puede utilizar la energía solar directamente, como será demostrado más adelante.

Las únicas fuentes de energía que provienen directamente de la Tierra son la energía geotérmica, basada en las altas temperaturas del interior del planeta, y la nuclear de fisión,

dado que los elementos que producen esta última son extraídos de minerales encontrados tanto en la tierra como en el mar. Para la nuclear de fusión los elementos se extraen del agua, ya sea del mar, ríos o lagos.

Finalmente, la acción gravitatoria de la Luna y del Sol provoca las mareas, cuyas diferencias de altura y flujo pueden ser utilizadas para producir energía.

En la Tabla 1-1 se resumen las fuentes de energía mencionadas y su origen, agrupadas en renovables y no renovables.

De ese conjunto cabe mencionar que, salvo la de los mares, las demás fuentes renovables son ya económicamente competitivas con la electricidad generada por los hidrocarburos, la nuclear y la hidráulica de alta potencia. En particular este libro se concentrará en el análisis de la conversión fototérmica de la energía solar a diferentes temperaturas.

Tabla 1-1: Diferentes tipos de fuentes de energía y su origen.

TIPOS DE FUENTES			ORIGEN	
Fuentes no Renovables	Carbón		El Sol	
	Petróleo			
	Gas			
	Nuclear	Fisión	Térmica (U_{235})	La Tierra El Mar
			Rápida (Pu, U_{233})	
Fusión		D-T		
		D-D		
Fuentes Renovables	Solar directa	Conversión fototérmica	El Sol	
		Conversión fotovoltaica		
	Eólica			
	Biomasa			
	Hidráulica			
	De los mares	Gradiente térmico		
		De las olas		
		Mareomotriz	Atracción gravitacional	
Geotérmica		La Tierra		

U = Uranio, Pu = Plutonio, D = Deuterio, T = Tritio.

La energía solar tiene dos características importantes: es inagotable y no es contaminante en sí misma, si bien su aprovechamiento debe ser analizado desde el punto de vista ambiental por el tipo de equipamiento y proceso empleados durante su fabricación, operación y desmantelamiento, lo denominado “ciclo de vida”. Además, está disponible, en mayor o menor medida, en cualquier lugar del planeta. Tiene la ventaja de poder ser colectada y transformada en el lugar mismo de utilización (aprovechamiento distribuido). Presenta baja densidad energética y su suministro es intermitente, por lo que es necesario captarla sobre superficies relativamente grandes y acumular, de alguna forma, la energía necesaria para las horas sin sol.

2 RADIACIÓN TÉRMICA. FÓRMULAS FUNDAMENTALES

Todo cuerpo que se calienta emite radiación electromagnética, cuyas características dependen de la temperatura. Se analizan los detalles de dicha radiación y las propiedades ópticas de las mismas al incidir sobre un cuerpo.

2.1 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES

Conocer las propiedades ópticas de los materiales utilizados en los colectores solares es esencial para optimizar el aprovechamiento de esta fuente de energía.

Se denomina índice de refracción al cociente de la velocidad de la onda en el vacío y la velocidad de la misma en el medio donde incide. Se simboliza con la letra (n) y se trata de un valor adimensional.

$$n = \frac{c \text{ (velocidad de la onda en el vacío)}}{V \text{ (velocidad de la onda en el medio)}}$$

Cuando la radiación electromagnética, en particular la radiación solar, que se propaga a través de un medio homogéneo, incide con una intensidad (I_i) sobre la superficie de un segundo medio homogéneo transparente, se pueden producir tres efectos, según se muestra en la Figura 2-1: reflexión [reflectancia (ρ) e intensidad (I_R)]; absorción [absorbancia (α) e intensidad (I_A)] y transmisión [transmitancia (τ) e intensidad (I_T)]. La cantidad de radiación reflejada depende de los índices de reflexión de ambos medios.

La primera ley de la termodinámica establece que la suma de estas fracciones, para una longitud de onda determinada, debe ser igual a la radiación incidente, por conservación de la energía.

$$I_i = I_R + I_A + I_T \quad (2-1)$$

Se define:

Reflectancia $R = I_R / I_i$

Transmitancia $T = I_T / I_i$

Absorbancia $A = I_A / I_i$

En el caso de cuerpos transparentes, se tiene que la suma de los tres factores mencionados es:

$$T + A + R = 1 \quad (2-2)$$

Desde el punto de vista de la óptica geométrica (ver Figura 2-2), el ángulo reflejado es igual al de incidencia ($\theta_i = \theta_r$), según la Ley de Reflexión, y el rayo refractado cumple la de Snell ^[2] ($n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r)$), estando todos los rayos en un mismo plano.

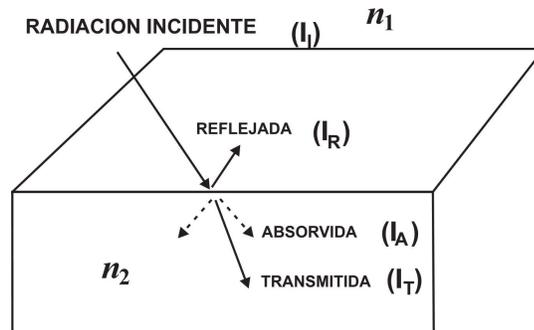


Figura 2-1: Efectos de reflexión y transmisión de la radiación electromagnética que incide de un medio de índice (n_1) a un cuerpo transparente de índice (n_2).

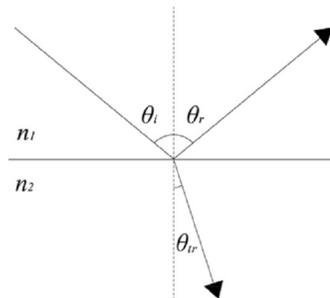


Figura 2-2: Visualización de las leyes de la reflexión y la refracción.

A. Reflectancia

La reflectancia mide la relación entre la amplitud del campo electromagnético reflejado respecto a la amplitud del campo incidente.

B. Transmitancia

La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente que pasa a través de una muestra.

Su expresión matemática es:

$$T = \frac{I_T}{I_i} = 10^{-\alpha l c} \quad (2-3)$$

[2] La ley de Snell (también llamada ley de Snell-Descartes) establece la relación entre el índice de refracción y el ángulo de entrada y salida de cada medio, respecto de la normal.

donde (ver Figura 2-3):

I_I = intensidad del rayo incidente

I_T = intensidad de la luz que atraviesa la muestra

c = concentración de sustancia absorbente en el medio

α = coeficiente de absorción de la sustancia

l = distancia que la luz atraviesa a través del cuerpo

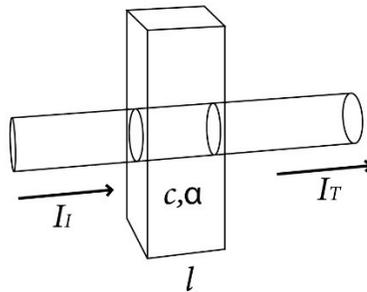


Figura 2-3: Transmitancia óptica de una sustancia con concentración (c) y coeficiente de absorción (α).

C. Absorbancia

Se denomina absorbancia a la medida de la cantidad de radiación absorbida, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración y de longitud de la trayectoria de la radiación.

La absorbancia (A), es proporcional al grosor del cuerpo sobre el que incide y la concentración de la sustancia en éste, y se define como:

$$A = \alpha \cdot l \cdot c$$

donde (α), (l) y (c) fueron determinadas anteriormente.

De acuerdo a la Ecuación 2-3, tenemos:

$$A = \alpha \cdot l \cdot c = -\log_{10} . T = -\log_{10} \cdot \left(\frac{I_T}{I_I} \right) \quad (2-4)$$

2.2 PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las radiaciones electromagnéticas, que se propagan en el vacío, pueden ser descriptas como ondas o partículas.

Como ondas presentan una longitud (λ) ^[3] (ver Figura 2-4) y una frecuencia (ν) ^[4] tal que el producto ($\lambda \cdot \nu$) es igual a la velocidad de la luz (c) en el medio en que se mueve, o la velocidad de la luz en el vacío (c_0), dividido por el índice de refracción (n) del medio.

$$\lambda \nu = c = c_0 / n \quad (2-5)$$

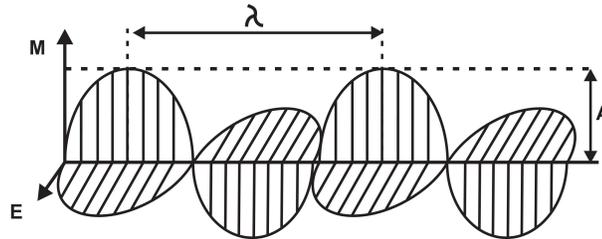


Figura 2-4: Onda electromagnética

Donde:

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad [5]$$

λ = longitud de onda en m

ν = frecuencia en 1/s

Como partículas, las radiaciones electromagnéticas son formadas por fotones que tienen una energía (E_ν) que es proporcional a la frecuencia.

$$E_\nu = h \cdot \nu \quad (2-6)$$

Donde la constante de proporcionalidad es la denominada Constante de Planck.

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \quad [6]$$

2.2.1 Ley de Planck

Es posible demostrar, a partir de la termodinámica estadística, que la densidad de energía, o irradiancia ^[7], de los fotones con longitud de onda (λ) o frecuencia (ν), emitidos por un cuerpo negro, está dada en función de la temperatura (T) por la siguiente expresión:

$$E_\lambda (T) = 2\pi \cdot h \cdot c^2 / [\lambda^5 \cdot (e^{hc/(\lambda kT)} - 1)] \quad (2-7)$$

[3] Longitud de onda: parámetro físico que indica el tamaño de la misma. Si se representa como una serie de crestas regulares (una línea ondulada), su longitud sería la distancia entre dos crestas consecutivas.

[4] Magnitud que mide el número de oscilaciones (o ciclos) que tienen lugar en una unidad de tiempo.

[5] m = metro, s = segundo

[6] J = Julio (Joule en inglés), unidad de energía derivada del sistema Internacional de Unidades (MKS)

[7] Irradiancia: Potencia solar incidente en una superficie por unidad de área, I (W/m^2). Donde W= Vatio (Watt en inglés) = J/s, unidad de potencia derivada del sistema MKS.

Siendo:

T = Temperatura absoluta del cuerpo negro en grado Kelvin (K) [8]

k = Constante de Boltzmann = $1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J / K

Agrupando términos aparecen las denominadas *primera* y *segunda constantes de radiación*, en el Sistema Internacional de Unidades o sistema MKS:

$C_1 = 2\pi hc^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ W.m²

$C_2 = hc/k = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ m.K

Con lo que, de la Ecuación (2-7), se tiene:

$$E_\lambda = C_1 / (\lambda^5 \cdot [(e^{C_2/\lambda T} - 1)]) \quad (2-8)$$

Donde (E_λ), energía emitida por unidad de área, tiempo y longitud de onda, se expresa en W/(m² μm) [9].

Por definición, un cuerpo negro es perfecto como absorbente de radiación y también como emisor.

$$\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda = 1$$

para todo (λ), donde:

α = coeficiente de absorción o absorbancia

ϵ = coeficiente de emisión o emitancia del cuerpo

El cuerpo negro no sólo tiene el mayor coeficiente de absorción, sino también el de emisión para todas las longitudes de onda. La ausencia de radiación reflejada sobre él, al ser totalmente absorbida, es la que le da el nombre, dado que el ojo humano lo vería totalmente negro. Si bien es una idealización, existen algunos que se aproximan bastante en su comportamiento; por ejemplo, un trozo grueso de carbón puede absorber el 99 % de toda la radiación incidente.

En la Figura 2-5 se representan gráficamente las emisiones de un cuerpo negro a distintas temperaturas, según la Ley de Planck.

Las emisiones para cada temperatura y longitud de onda (E_λ), divididas por la emisión para la irradiancia máxima ($E_{\lambda \max}$), se muestra en la Figura 2-6.

[8] El kelvin (K), es una de las unidades del Sistema Internacional de Unidades y corresponde a una fracción de 1/273,16 partes de la temperatura del punto triple del agua; la temperatura de 0 K es denominada «cero absoluto», que corresponde al punto en el que las moléculas y átomos de un sistema tienen la mínima energía térmica posible. Se le denomina «temperatura absoluta» y está relacionada con la escala Celsius por $K = C + 273,16$.

[9] Las longitudes de onda, indicadas usualmente con la letra λ , se miden en micro metros ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros) y en nano metros ($\text{nm} = 10^{-9}$ metros).

En las Figuras 2-5 y 2-6 es claro el desplazamiento de las curvas hacia longitudes de onda mayores, a medida que disminuye la temperatura. Por otro lado, se observan los corrimientos en la superposición de los espectros, [curva de un emisor a 6.000 K (radiación solar) y curva de un emisor a 400 K], lo cual es muy importante cuando se analiza el efecto invernadero ^[10].

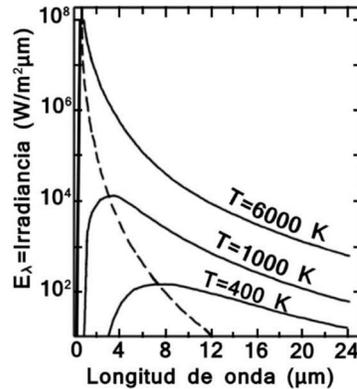


Figura 2-5: Irradiancia de un cuerpo negro según la Ley de Planck para diferentes temperaturas. La línea cortada indica el desplazamiento del máximo de emisión para cada temperatura, según la Ley de Wien. Referencia [1].

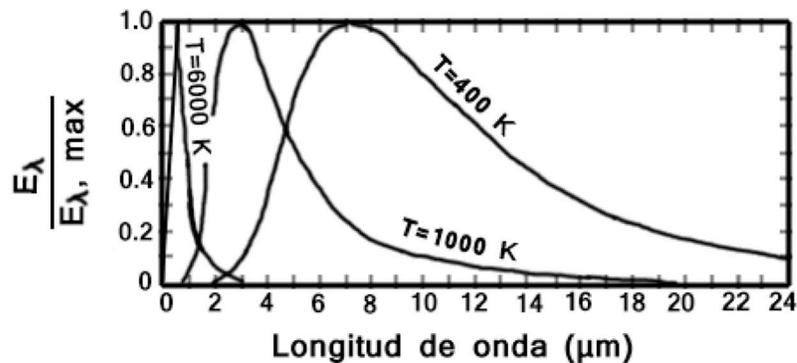


Figura 2-6: Irradiancia dividida por su valor máximo, para cada temperatura en función de la longitud de onda. Referencia [1].

2.2.2 Ley de Wien

El desplazamiento antes mencionado se expresa, para la longitud de onda correspondiente al valor de máxima irradiancia, a través de la Ley de Wien, que dice:

El producto de la longitud de onda correspondiente al máximo de irradiancia de un cuerpo negro por la temperatura del cuerpo es una constante.

[10] Se define en Capítulo 4.1.

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K} = \text{constante}$$

Para el caso de la fotosfera solar con una temperatura de 5.780 K, el pico de emisión se produce a $0,5013 \mu\text{m} = 5,013 \cdot 10^{-7} \text{m}$.

En la Figura 2-5 la línea de trazos une los puntos de máxima irradiancia.

Es decir, la máxima emisión energética de un cuerpo negro se produce para la longitud de onda $2.897,8 / T [\mu\text{m}]$. Asimismo, más del 95 % de la energía emitida está en el rango de longitudes de onda $0,5 \lambda_{\max}$ y $8,0 \lambda_{\max}$.

2.2.3 Ley de Stefan Boltzmann

Si integramos la Ecuación 2-8 desde la longitud de onda cero hasta infinito, que es el área bajo las curvas de la Figura 2-5, se tiene la energía total emitida por un cuerpo, que está dada por:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (2-9)$$

donde:

E = se expresa en W m^{-2}

T = temperatura en K

$\sigma = \frac{2 \pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) = 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4) = \text{constante de Stefan-Boltzmann en el Sistema Internacional de Unidades}$

$\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-5} \text{ erg} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)$ en el Sistema Cegesimal de Unidades

donde:

erg (ergio) = $10^{-7} \text{ W} \cdot \text{s}$.

Conclusión, a medida que aumenta la temperatura, es mayor la energía total que emite un cuerpo.

Los cuerpos reales no se comportan como el negro ideal, por lo que se define su emitancia (ϵ) a temperatura real (T_r) como el cociente entre la energía total emitida por este y la que emitiría un cuerpo negro ideal a la misma temperatura.

$$\epsilon (T_r) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \cdot E(\lambda, T_r) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} E(\lambda, T_r) \cdot d\lambda} \quad (2-10)$$

De la misma manera se puede definir la emitancia para cada longitud de onda, aplicando esta definición a cada frecuencia del espectro electromagnético.

Luego, para un cuerpo real la Ecuación (2-9) pasa a ser:

$$E (T_r) = \epsilon \cdot E = \int_0^{\infty} \epsilon \cdot \sigma T^4 \quad (2-11)$$

La energía depende de la cuarta potencia de la temperatura, por lo que la emisión de radiación por los cuerpos terrestres cambia considerablemente durante el día o a través de las estaciones. Por ejemplo, a 30 °C la radiación emitida por unidad de superficie es 52 % mayor que la emitida a 0 °C, a pesar de que el incremento en la temperatura absoluta fue sólo del 11 %.

3 ORIGEN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y SU COMPOSICIÓN ESPECTRAL

El radio (R_0) del Sol es $6,96 \cdot 10^5$ km^[11] (diámetro $13,9 \cdot 10^5$ km), o sea 109 veces el de la Tierra, que es de 6.371 km^[12] (diámetro 12.742 km), y la distancia media entre ambos es de $1,496 \cdot 10^8$ km^[13] [ver Figura 3-1].

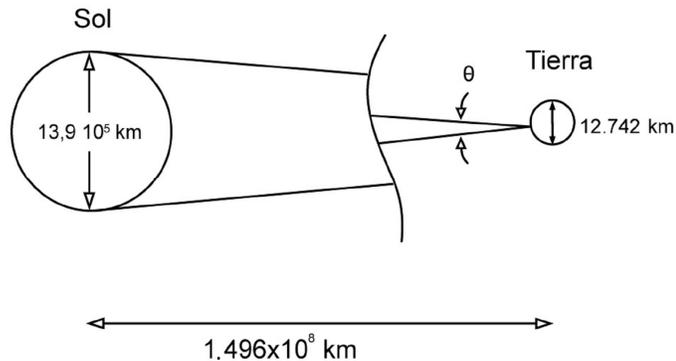


Figura 3-1: Relación geométrica del sistema Sol-Tierra (fuera de escala). $\Theta = 32'$.

A la Tierra llegan rayos provenientes de toda la esfera solar, contenidos en la denominada apertura angular del Sol, dado en la Ecuación 3-1.

$$\theta = 0,0094 \text{ rad} = 0,54^\circ = 32' \quad (3-1)$$

Este ángulo es importante para el diseño del receptor de concentradores de radiación solar, como se discute en el Capítulo 8.

En el Sol se producen reacciones complejas de fusión nuclear que generan muy altas temperaturas, estimándose que cerca del centro esta es de 15.000.000 K. La radiación emitida desde este foco es absorbida en su mayor parte por la capa de iones de hidrógeno

[¹¹] La nave espacial SOHO no tripulada se utilizó para medir el radio del Sol, observando el tránsito de Mercurio el 7 de mayo de 2003 y el 8 de noviembre del 2006, dando un radio medio de 696.342 ± 5 km. Emilio, Marcelo; Kuhn, Jeff R.; Bush, Rock I.; Scholl, Isabelle F., «Measuring the Solar Radius from Space during the 2003 and 2006 Mercury Transits», *The Astrophysical Journal*.

[¹²] Radio medio volumétrico. William F. Riley; Leroy D. Sturges (1996). *Ingeniería mecánica: Estática*. Reverte. pp.7-. ISBN 978-84-291-4255-6.

[¹³] La unidad astronómica (abreviada ua, au, UA o AU) es una unidad de longitud igual, por definición, a 149.597.870.700 m, que equivale aproximadamente a la distancia media entre la Tierra y el Sol. *Astronomical Unit, or Earth-Sun Distance, Gets an Overhaul*. Geoff Brumfiel . <https://www.scientificamerican.com/article/astronomical-unit-or-earth-sun-distance-gets-an-overhaul/>

que lo rodea. La capa externa del Sol, que se denomina fotosfera (Figura 3-2), tiene una temperatura de $\sim 5.800\text{ K}$ muy inferior a la del centro, y es la responsable de la emisión de la radiación solar que llega a la Tierra.

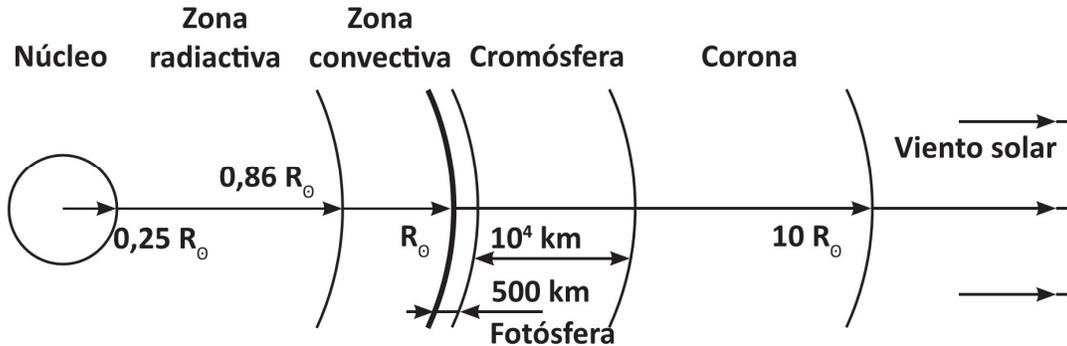


Figura 3-2: Zonas que componen el Sol (fuera de escala). Referencia [14].

La Figura 3-3 muestra el espectro solar de la distribución de energía en función de la longitud de onda, que es el adoptado por la NASA en base a la propuesta hecha por Thekaekara y Drummond [15], donde la energía está expresada por unidad de tiempo, de área y de intervalo de longitud de onda.

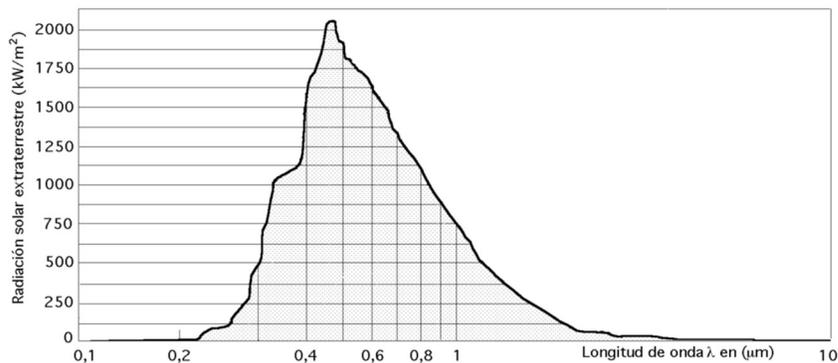


Figura 3-3: Curva estándar de la radiación solar extraterrestre. Referencia [15]

La radiación emitida por el Sol se asemeja bastante al espectro de emisión de un cuerpo negro a 5.800 K , ver Figura 3-4.

De acuerdo con la longitud de onda de los fotones que componen la radiación solar, se la puede subdividir en: radiación ultravioleta, infrarroja y luz visible; ver Tabla 3-1 y Figura 3-5.

[14] Radiación Solar: Medición y Modelado - Hugo Grossi Gallegos y Carlos Raichijk. Editorial edUTecNe, 2017.

[15] Standard Values for the Solar Constant and its Spectral Components, M. P. Thekaekara y A. J. Drummond. Nature Physical Science vol. 229, pag. 6–9 (1971).

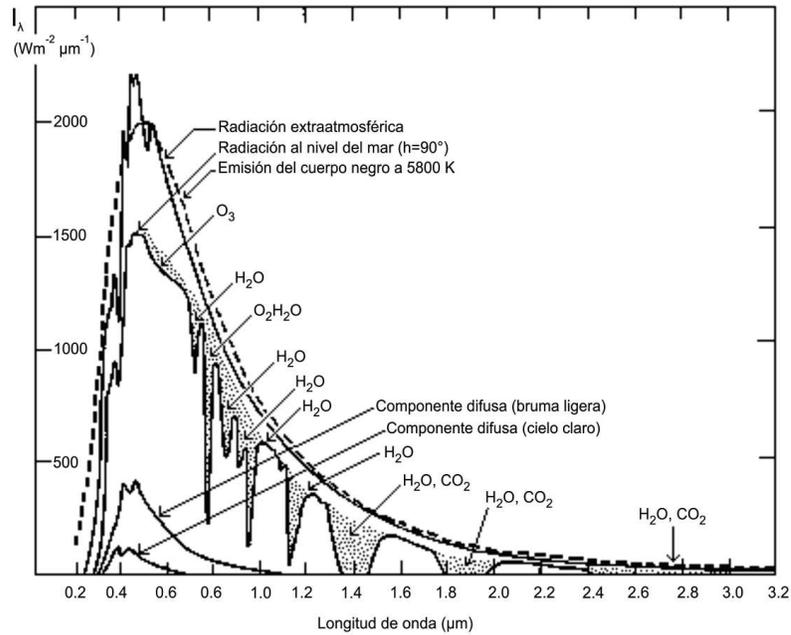


Figura 3-4: Distribución espectral de la radiación solar extra atmósfera y a nivel del mar; las cavidades en la curva indican absorción por diferentes componentes en la atmósfera. Observar la similitud con la curva de emisión de un cuerpo negro a ~5.800 °K. Longitud de onda en micrómetro (10^{-6} m). Referencia [16].

Tabla 3-1: Las tres grandes regiones del espectro solar.

	Radiación Ultravioleta (UV)	Luz Visible (V)	Radiación Infrarroja (IR)
Longitud de onda	< 380 nm	380 nm a 780 nm	> 780 nm
Energía contenida	8 %	41 %	51 %

[16] Chassériaux, J.M. (1990). *Conversión térmica de la radiación solar*, primera edición, pp 136-143. Librería Agropecuaria S.A. Buenos Aires, Argentina.

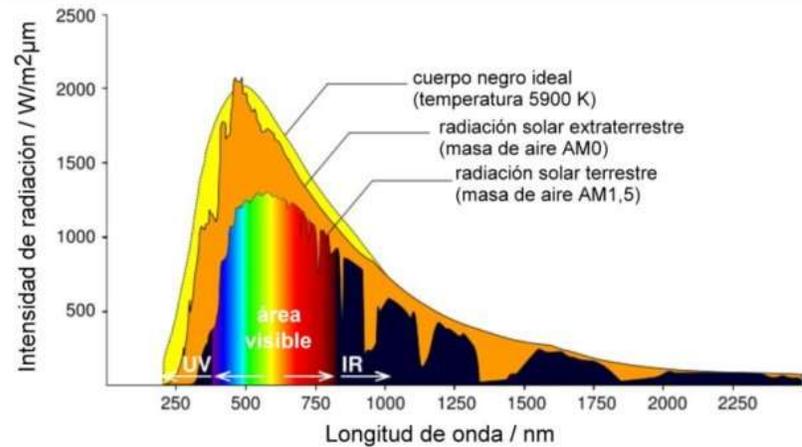


Figura 3-5: Distribución espectral de la radiación solar en nanómetros. Referencia [17].

La radiación ultravioleta, cuyos fotones son los que tienen más energía, produce la ruptura de muchas uniones químicas y, por lo tanto, es la responsable del envejecimiento de los materiales expuestos al Sol. La luz visible, que como su nombre lo indica, es la que puede ser vista por el ojo humano, puede descomponerse a su vez según las longitudes de onda de los diferentes colores, como se muestra en la Tabla 3-2. La radiación infrarroja, que no es visible, puede ser, sin embargo, detectada por los elementos sensibles al calor que tiene la piel humana.

Tabla 3-2: División espectral de la luz visible.

Color	Longitud de onda (nm)
Rojo	618-780
Anaranjado	681-618
Amarillo	570-581
Verde	497-570
Celeste	476-497
Azul	427-478
Violeta	380-427

[17] <https://climaambientesociedad.wordpress.com/2016/09/03/la-radiacion-ultra-violeta-y-su-efecto-en-la-poblacion/>

La composición espectral de la radiación solar es importante para un tipo de colector, las celdas fotovoltaicas, que sólo la aprovechan dentro de un intervalo determinado de longitudes de onda.

Asimismo, el corrimiento en longitudes de onda de los espectros de emisión en función de la temperatura, es un fenómeno importante en la conversión térmica de la energía solar, donde se hace uso del efecto invernadero, como se mencionó.

3.1 RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

La Tierra, al girar alrededor del Sol, describe una órbita elíptica variando la distancia entre ellos a lo largo del año (ver Figura 3-6).

A principio de enero se tiene la máxima proximidad al Sol (perihelio), con una distancia de 142.700.000 km, que corresponde a unos 15 días después del Solsticio de verano para el Sur, y de invierno para el Norte.

Para principios de julio se da la máxima lejanía del Sol (afelio), con una distancia de 151.800.000 km, que corresponde a unos 15 días después del Solsticio de invierno para el Sur, y de verano para el Norte.

La distancia media del Sol a la Tierra es de $1.496 \cdot 10^8$ km, que es la correspondiente entre los equinoccios.

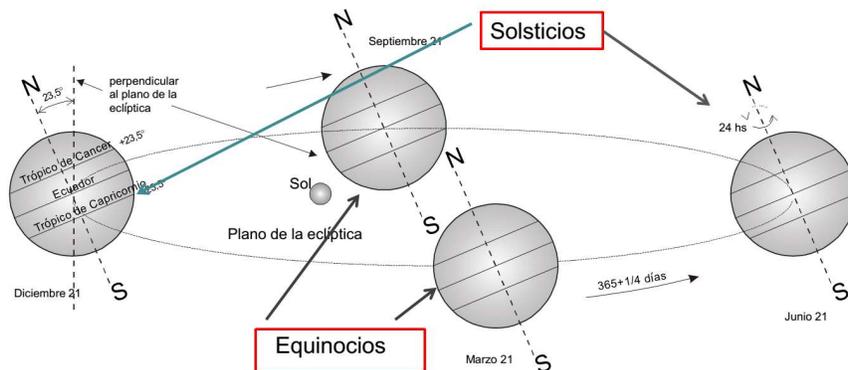


Figura 3-6: Movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

La radiación que llega al tope de la atmósfera terrestre cuando la distancia Tierra-Sol está en su valor medio, se la denomina constante solar (I_{SC}) y es la energía total recibida por unidad de tiempo sobre la unidad de área, expuesta en forma perpendicular a los rayos solares en el vacío.

El valor de (I_{SC}) aceptado por la Organización Meteorológica Mundial en 1982 ^[18] es:

$$I_{SC} = (1.367 \pm 7) \text{ W/m}^2 \quad (3-2)$$

[18] Informe final abreviado de la Octava Reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, OMM, N° 590. Anexo II, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.

El valor tomado es un promedio, dado que la intensidad de la radiación es afectada por la actividad solar y sigue sus variaciones (ver Figura 3-7), como fue mostrado por las mediciones efectuadas por satélites desde 1978.

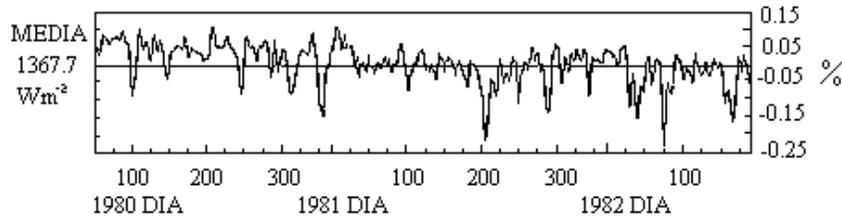


Figura 3-7: Variación de la "constante solar". Referencia [19].

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está atenuada, en su intensidad, por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera que contiene, entre otros, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, nubes y partículas de polvo (ver Figura 3-4).

Estos procesos son:

- a) Absorción selectiva;
- b) Dispersión molecular (o de Rayleigh ^[20])
- c) Dispersión por aerosoles (o de Mie ^[21])

De hecho, sólo son significativos los efectos producidos en la capa más densa, la troposfera, de aproximadamente 11 km de espesor. Un valor típico de la radiación solar que incide sobre la Tierra en un plano perpendicular a los rayos solares en un día despejado y al mediodía, a nivel del mar, es de 1.000 W/m².

En la región de ondas de la radiación visible se observan bandas del oxígeno molecular entre 0,6884 μm y 0,761 μm, del ozono entre 0,45 μm y 0,78 μm, del dióxido de nitrógeno (caracterizado por un semicontinuo entre 0,25 μm y 0,58 μm) y del vapor de agua, con bandas entre 0,54 μm y 0,74 μm.

En la Figura 3-8 se muestra el efecto de la interacción de la radiación solar incidente con la atmósfera.

[19] Wilson R.C. 1984. Measurement of solar irradiance and its variability. Space Sci. Rev. Vol. 38, pp 203-242.

[20] La dispersión de Rayleigh es la dispersión de la luz visible, o cualquier otra radiación electromagnética, por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados.

[21] El efecto Mie se produce cuando la luz choca con partículas o moléculas grandes. Las partículas absorben una parte de la luz y reflejan el resto, como pequeños espejos.

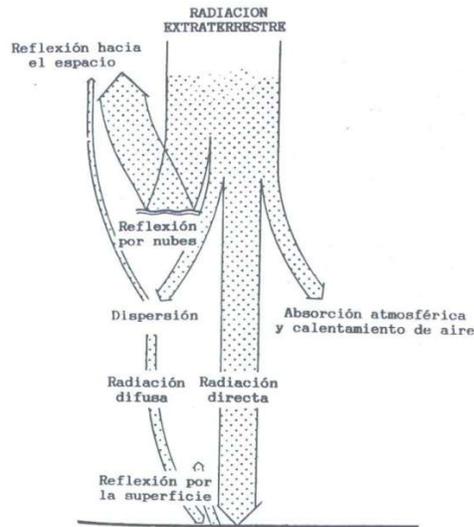


Figura 3-8: Interacción de la radiación solar con la atmósfera.

Los procesos mencionados modifican las características de la radiación incidente. Una parte de la misma, procedente del centro del Sol y de la zona circunsolar ($\sim 0,54^\circ$), mantiene la dirección y llega a la superficie terrestre sin sufrir desviaciones y se la denomina “radiación solar directa” (I en la Figura 3-9); se la mide sobre un plano perpendicular a la dirección de los rayos solares. Está compuesta por un haz paralelo de fotones.

Se indica como:

I_b = Instantánea u horaria

\bar{I}_b = Promedio Diario

H = Diaria, Promedio mensual

El fenómeno de dispersión de la radiación del Sol es el más importante en la parte visible del espectro solar. Al ser dispersado por una partícula, el fotón incide sobre otra, y así sucesivamente, en un proceso denominado “dispersión múltiple”, y continuará avanzando. En una atmósfera limpia, aproximadamente la mitad de la energía así esparcida volverá al espacio y la otra mitad alcanzará el suelo.

Se denomina “radiación solar difusa” (D en la misma Figura 3-9) a la que es dispersada o difundida por la atmósfera y que incide sobre la superficie terrestre sin una dirección definida. Se la mide sobre un plano horizontal.

Finalmente, la “radiación global o total” (G) es la suma de las dos anteriores (se mide también sobre un plano horizontal), pudiéndose expresar matemáticamente como:

$$G = D + I \cdot \text{sen}(h) = D + I \cdot \cos(\theta) \quad (3-3)$$

donde (h) es la altura solar (ver Figuras 3-9 y 3-10), entendiendo como tal al ángulo formado por la dirección de los rayos y el plano horizontal, mientras que (θ) es el formado por la dirección de los mismos y la perpendicular a dicho plano.

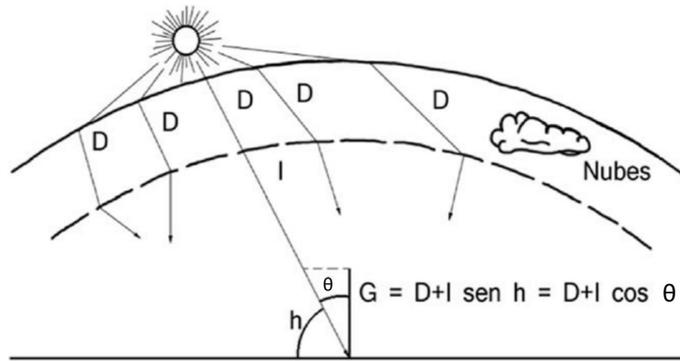


Figura 3-9: Diferentes componentes de la radiación solar. Referencia [1].

La relación entre radiación solar directa y difusa es diferente en función de la hora del día y depende también de las características de cada lugar, alcanzando la primera valores de 80-85 % del total para atmósferas muy limpias. Para atmósferas muy contaminadas, y en ausencia de nubes, puede reducirse a valores del orden de 50 %. Si la bóveda celeste está completamente cubierta, los rayos solares son totalmente dispersados, llegando a la superficie terrestre solo la radiación difusa.

Esta distinción entre los dos componentes básicos de la radiación solar es muy importante, pues ciertos equipos, como aquellos que funcionan sobre la base de concentradores de esta radiación, sólo utilizan el componente directo y, por lo tanto, no serán recomendables en regiones con altos porcentajes de difusa.

3.2 AEROMASA

El camino óptico recorrido por la radiación solar es diferente según sea la altura cenital del Sol, y ello conduce al concepto de masa atmosférica o masa de aires o aeromasa (AM), la cual es atravesada por esta radiación.

A medida que la radiación solar pasa a través de la atmósfera y es absorbida por el aire y el polvo, las diferentes masas de aire generan una reducción de su potencia.

El espesor de la masa de aire depende de la elevación del Sol en la bóveda celeste, por lo tanto, varía con el tiempo a lo largo del día, con el pasar de las estaciones del año y con la latitud a la que se encuentra el observador.

Para la distancia (CB) en línea recta a través de la atmósfera y la radiación solar incidente en el ángulo (h) con respecto a la superficie terrestre (ver Figura 3-10), el valor de masa de aire o aeromasa se define:

$$MA = CB/AB = 1/ \text{sen } h \quad (3-4)$$

donde (AB) es la distancia perpendicular a la superficie de la Tierra, con el Sol en el cenit, lo que corresponde al espesor de la atmósfera.

Cuando el sol se encuentra en el ángulo ($h=90^\circ$) se dice que la radiación solar atraviesa una atmósfera terrestre (AM1), produciéndose la mínima absorción. Para ángulos menores,

esta debe atravesar espesores más grandes y por lo tanto será mayor la absorción. Se denomina (AM0) al espectro solar fuera de la atmósfera.

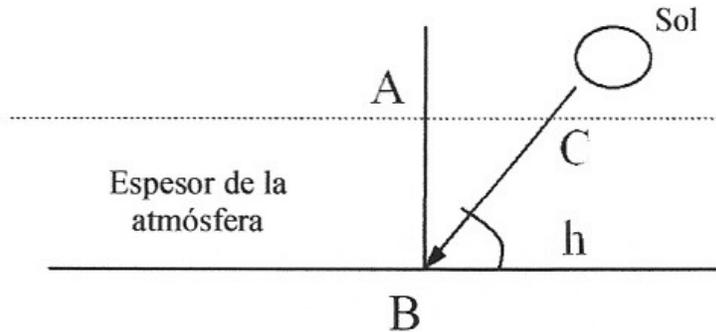


Figura 3-10: Altura del sol.

En la Tabla 3-3 se muestra la masa atravesada por la radiación, que es obtenida a partir de la Fórmula 3-4, y la masa real, en donde se han tenido en cuenta la curvatura de la Tierra y la refracción de los rayos solares al cruzar la atmósfera [22].

Tabla 3-3: Determinación de la masa atmosférica en función de la altura aparente del Sol, para una presión de 760 mm de Hg.

Ángulo h	Masa atmosférica $m = 1 / \text{sen } h$	Masa verdadera
90	1	1
80	1,02	1,015
70	1,06	1,064
60	1,16	1,154
50	1,31	1,304
40	1,56	1,553
30	2	1,995
20	2,92	2,904
15	3,86	3,816
12	4,81	4,716
10	5,76	5,6

Tanto la posición relativa del sol cuanto las condiciones atmosféricas afectan la radiación solar disponible en cada instante a nivel de suelo. La latitud, la altura del lugar y la estación del año también son factores que determinan la energía disponible.

En la Figura 3-11 se muestra la distribución espectral de la radiación solar directa a nivel del

[22] Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Pedro Fernández Díez, <https://issuu.com/merlucin/docs/01solar/10>.

mar, con cielo claro y ambiente seco, para diferentes alturas (h) del Sol. Para cada una de ellas, el espesor de capa atmosférica corresponde a una aeromasa (AM1), a dos (AM2), a cuatro (AM4) y a ocho (AM8). Como referencia, en todos los casos se indica el espectro (AM0), así como la variación de la distribución porcentual de la radiación ultravioleta (UV), visible (Vis) e infrarrojo (IR).

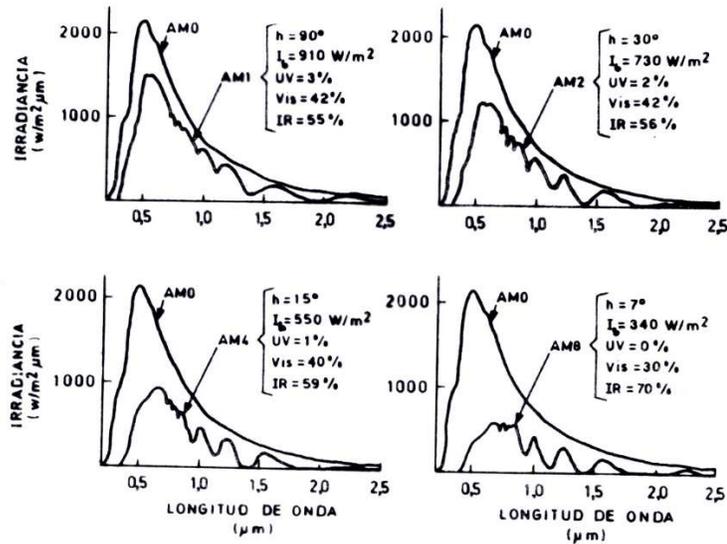


Figura 3-11: Distribución espectral de la radiación solar directa a nivel de mar para diferentes alturas (h) del Sol.

En la Tabla 3-4 se puede ver la relación que hay entre la radiación solar directa, difusa y global para las mismas horas del día y mismas condiciones de la Figura 3-11.

Tabla 3-4: Relaciones de radiación directa, difusa y global.

Posición del Sol		Irradiancia (W/m ²)			
Altura del Sol (h)	Masa Atmosférica	Directa		Difusa	Global
		I_b	$I_b \text{ sen } h$	D	$G= I_b \text{ sen } h + D$
	AM0	1353	----	-----	-----
90°	AM1	910	910	130	1040
30°	AM2	360	360	80	440
15°	AM4	550	140	50	190
7°	AM8	340	40	30	70

Si se mide la radiación solar global a lo largo de 24 horas se obtiene, en un día despejado, semi-nublado y nublado, la gráfica mostrada en la Figura 3-12.

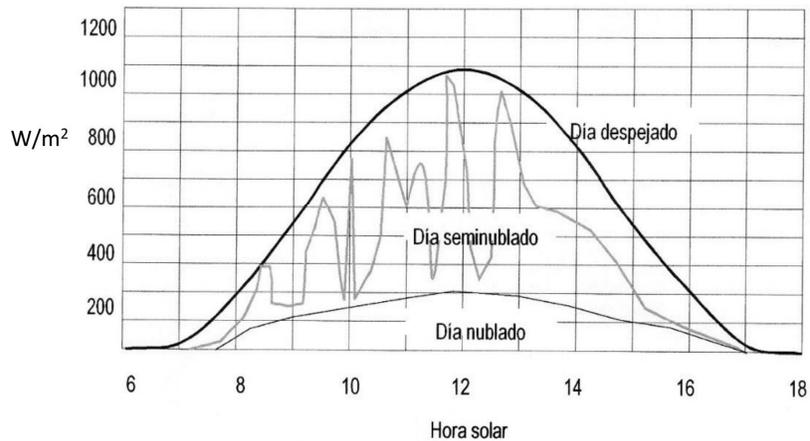


Figura: 3-12: Radiación solar global a lo largo de días típicos, la cual es representada como la energía que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo (W/m^2).

Sumando los v

alores horarios durante 24 horas se obtiene la energía solar diaria, comúnmente expresada en Wh por metro cuadrado y por día, o en alguno de sus múltiplos, por tratarse de valores muy grandes (kWh/m^2 . día o MWh/m^2 . día). En la Tabla 3-5 se da la relación de kWh, la unidad que más se emplea, con otras unidades de energía.

Tabla 3-5: Relación de unidades de energía.

J (Joule)	kWh (kilowatt-hora)	kcal (kilocaloría)	Btu (British Thermal Unit)	Tep (tonelada equivalente de petróleo)
1	$2,778 \times 10^{-7}$	$2,388 \times 10^{-4}$	$9,478 \times 10^{-4}$	$2,346 \times 10^{-11}$

La radiación solar diaria promedia mensual se obtiene de los valores para todo este periodo. Como ejemplo, se muestran en las Figuras 3-13 y 3-14 las cartas que ilustran estos datos, conforme al “Atlas de Energía Solar de la República Argentina”, desarrollado por Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini ^[23], donde se puede apreciar la influencia de los parámetros mencionados. Asimismo, en la Figura 3-15 se muestra la distribución del promedio de la energía solar acumulada anualmente sobre un plano horizontal, conforme otro trabajo presentado por el primer autor anteriormente citado ^[24],

[23] https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/images/b/b6/Atlas_de_energ%C3%ADa_solar_de_la_Rep%C3%BAblica_Argentina_-_Grossi_Gallegos_%26_Righini.pdf

[24] Grossi Gallegos H. Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. Energías Renovables y Medio Ambiente vol. 5, pp. 33-42.

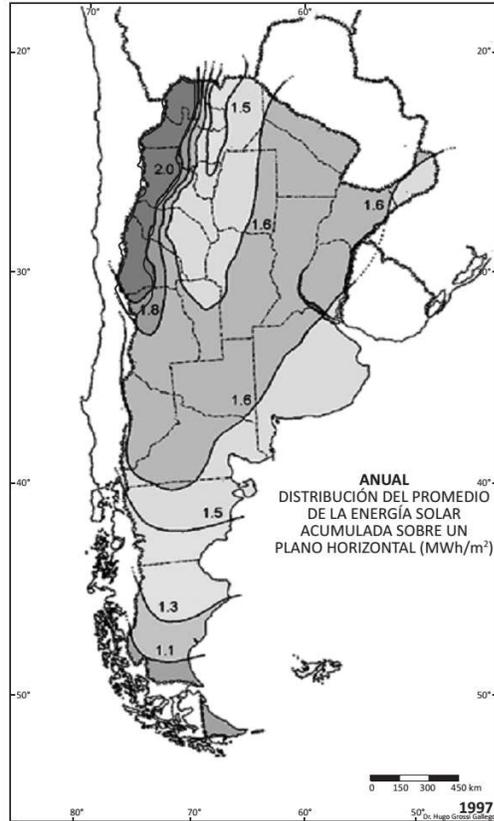


Figura 3-15: Distribución del promedio de la energía solar acumulada anualmente sobre un plano horizontal, MWh/m².

3.3 RECURSO ENERGÉTICO DISPONIBLE

La cuantificación del recurso energético solar es diferente a la que se realiza para los convencionales como petróleo, gas, carbón y uranio, que son no renovables. En el caso de estos últimos, la cantidad de energía almacenada en los reservorios se puede estimar y extraer la necesaria según la demanda. Al tratar de cuantificar el primero, deberá tenerse en cuenta que es de disponibilidad cíclica no controlable por el hombre y su densidad energética baja, si bien es un recurso renovable e inagotable.

Para entender la abundancia de este recurso se analizará un ejemplo en la República Argentina. La radiación solar que llega al norte del río Colorado ^[25], es de 4,58 kWh/m².día promedio anual. La central hidroeléctrica “El Chocón” tiene una potencia de 1.200 MW, con generación de 2.700 GWh/año. El área del embalse es de 816 km². La energía eléctrica consumida en el país en el año 2020 ^[26] fue de 127.306 GWh/año. Con una eficiencia del 20 % de los paneles fotovoltaicos, se habría podido atender a la demanda nacional en una

[25] Río que corre de oeste a este y limita las provincias de Mendoza y Neuquén (dónde se encuentra la central hidráulica mencionada en el parágrafo) y las provincias de la Pampa y Río Negro.

[26] <https://microfe.cammesa.com/static-content/CammesaWeb/download-manager-files/NovedadesHome/Resumen%20Anual%202020%20vs%202019%2014Ene.pd>.

superficie de 381 km², lo que representa aproximadamente 47 % del área de la represa neuquina y una generación energética 47 veces mayor que dicha central.

Estos valores indican que la energía solar es abundante, y su empleo masivo dependerá de los costos relativos que se alcancen para un uso integral de la misma, incluyendo los referentes a los sistemas de acumulación y transporte, cuando necesarios.

4 CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR

Como fue mencionado, parte de la radiación solar que llega a nuestro planeta es colectada y convertida en otras formas de energía, por el gran sistema termodinámico que integran la Tierra y su atmósfera. Pero, además, es posible aprovechar la energía solar a través de diferentes tecnologías para producir electricidad y calor, con la utilización de los colectores solares, que son clasificados de acuerdo con el proceso de conversión aplicado, a saber, fototérmica y fotovoltaica.

En este libro se va a estudiar solamente la conversión de energía solar a térmica.

El aprovechamiento de la energía solar requiere de la utilización de dispositivos que la capten y la transformen en térmica, compatible con la demanda que se pretende satisfacer.

Se verá primeramente los principios de funcionamiento y la descripción de los equipos de conversión de energía solar, para analizar luego los sistemas completos que se utilizan en las diferentes aplicaciones.

4.1 EFECTO INVERNADERO

El denominado “efecto invernadero” es el principio que más se utiliza para conversión de energía solar a térmica, tanto en colectores planos como en los receptores de los concentradores. Su nombre proviene del tipo de sistema que permite cultivar plantas que requieren temperaturas superiores al ambiente, cuyo interior se calienta aprovechando la radiación sola, principalmente en invierno.

El “efecto” se produce porque el vidrio, por ejemplo, tal cual otros materiales, posee la característica de ser transparente para la radiación solar y opaco para la radiación térmica, lo que significa que su transmitancia es distinta para diferentes longitudes de onda (Figura 4-1). En el caso particular de esta figura, se demuestra la transmisión de la radiación electromagnética de un vidrio conformado por flotación ^[27], de 6 mm de espesor y otro denominado “heat absorbing “. Se ha adicionado el espectro de la radiación solar, cuyo máximo de emisión se encuentra en la longitud de 0,5 micrones, así como el de emisión de un cuerpo negro calentado a la temperatura de 373 K (100 °C), con el máximo de emisión en 8,5 micrones. Se observa que para ambos vidrios la radiación solar, en el rango del visible, los atraviesa con un alto porcentaje, mientras que la térmica emitida por el cuerpo caliente a 100 °C no lo podrá hacer.

Por otro lado, al analizar estos efectos en un dispositivo como el que se muestra en la Figura 4-2, se observa que la radiación solar atraviesa el vidrio, con una pequeña pérdida por reflexión, incidiendo sobre una superficie absorbente, que normalmente se la

[27] En el Capítulo 9.10 de analizan las características de los vidrios.

denomina convertidor, que puede ser una chapa pintada de negro, donde se convierte en calor.

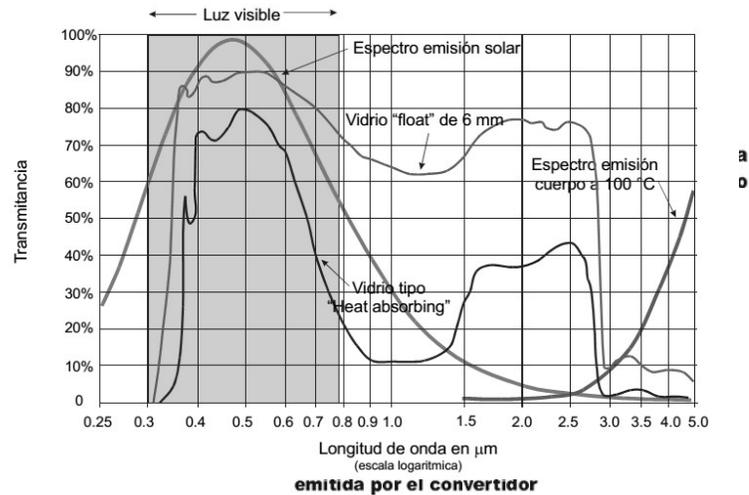


Figura 4-1: Espectro de transmisión de vidrios en función de la longitud de onda. Referencia [1].

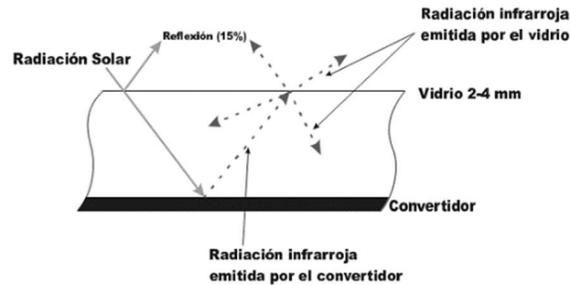


Figura 4-2: Principio de funcionamiento del efecto invernadero. Referencia [1].

El convertidor caliente emite radiación infrarroja, con longitudes de onda superiores a los 3 micrones para las cuales el vidrio tiene transmisión casi cero, reflejándose una parte y absorbiéndose otra. La parte que es absorbida es emitida en todas direcciones; la mitad que va hacia arriba se pierde, y la que va hacia abajo es absorbida nuevamente por la superficie negra (ver Figura 4-2). Al incidir continuamente la radiación solar, quedando la radiación infrarroja parcialmente “atrapada” por efecto del vidrio, la chapa negra se va calentando hasta que se establece un equilibrio entre la energía suministrada por el Sol y las pérdidas térmicas hacia el medio exterior. Además, a medida que la temperatura del absorbedor se incrementa, la longitud de onda de la radiación infrarroja que emite se acerca a los valores donde el vidrio es transmisor.

La cubierta de vidrio también impide la libre circulación del aire ambiente sobre el absorbedor, que tiene pérdidas por radiación, conducción y, por diferencia de temperatura

entre la superficie caliente y el vidrio, por convección interna. Se puede reducir estas últimas dos si, en ese espacio, es viable realizar el proceso de vacío.

Es posible incrementar el efecto invernadero colocando una segunda cobertura transparente, pero no es práctico usar más de dos cubiertas, dado que cada una de ellas disminuye alrededor del 15 % la radiación incidente.

4.2 SUPERFICIES SELECTIVAS

Las superficies selectivas producen un efecto similar al invernadero, pero a partir de principios diferentes. En estas las propiedades de absorción y emisión son selectivas en longitud de onda; tienen un elevado coeficiente de absorción para el espectro visible y el infrarrojo cercano, pero un coeficiente de emisión muy bajo para longitudes del infrarrojo lejano ($\lambda > 3\mu$). Se las utilizan combinadas con dispositivos que dan origen al efecto invernadero, recubriendo la superficie absorbente de estas unidades.

La absorbancia solar (α_s) se define como el cociente entre la energía total que incide, obtenida por integración de la intensidad espectral (I_λ) en el intervalo de longitudes de onda del espectro solar (0,35 a 3 μ m), y la integración de la absorbancia (α_λ) en el mismo intervalo.

$$\alpha_s = \frac{\int_{0,35\mu m}^{3\mu m} \alpha_\lambda I(\lambda) d\lambda}{\int_{0,35\mu m}^{3\mu m} I(\lambda) d\lambda} \quad (4-1)$$

donde (α_λ) es el coeficiente de absorción para la longitud de onda (λ).

Al incidir radiación solar sobre la superficie de un determinado sólido opaco, una fracción es absorbida y el resto es reflejada. Para cada longitud de onda se cumple que

$$\alpha_\lambda = 1 - r_\lambda$$

siendo (r_λ) la reflectancia de esa superficie. Luego, un material que sea buen absorbedor de la energía comprendida en cierto intervalo de longitudes de onda, debe ser muy poco reflectante en ese rango.

Si (T) es la temperatura de la superficie, esta perderá parte de la energía absorbida en forma de radiación infrarroja a razón de lo que dispone la Ecuación 2-10.

$$E = \varepsilon \cdot \Sigma \cdot T^4$$

Luego, para que una superficie pierda poca energía por radiación térmica, se requiere que tenga emitancia (ε) baja en la zona de infrarrojo medio y lejano.

Además, en el equilibrio térmico $\varepsilon_\lambda = 1 - r_\lambda$, se desprende que una superficie de baja emitancia térmica posee alta reflectividad infrarroja.

Se suele definir un factor de selectividad como:

$$F_s = \alpha / \varepsilon \quad (4-2)$$

Sin embargo, como se verá más adelante, este coeficiente no expresa “per se” la figura de mérito de una superficie selectiva.

En la Figura 4-3 se puede ver el mecanismo de funcionamiento de las superficies selectivas; en la parte superior se indican los espectros de emisión de un cuerpo negro a 5.800 K (similar al espectro solar) y de un cuerpo a 700 K (430 °C) que prácticamente emite radiación sólo en la zona de infrarrojo. Las superficies selectivas utilizadas poseen las propiedades indicadas en la figura inferior, o sea, un elevado coeficiente de absorción para longitudes de onda más cortas que 2 μm y un bajo coeficiente de emisión para longitudes de onda más largas.

Igualmente, en Figura 4-4 se muestra el espectro de radiación solar para AM1 y los tres de emisión de un cuerpo negro ideal a diferentes temperaturas que están fuera de escala, así como la absorbancia ideal. Vemos que no hay interferencia entre ellos a las temperaturas que se debe alcanzar para el aprovechamiento de la energía solar. Esta no interferencia hace posible que esta superficie sea altamente absorbente en la zona solar y pobremente emisiva en otra.

Se muestra, además, las características de una superficie selectiva ideal; la misma presenta absorbancia uno para el intervalo de (λ) desde 0,2 hasta la longitud de onda de corte, y un valor cero, o sea, emitancia nula para longitudes mayores. En la práctica, no se obtienen superficies que cumplan con estas características de selectividad ideal y debe analizarse el comportamiento para cada caso.

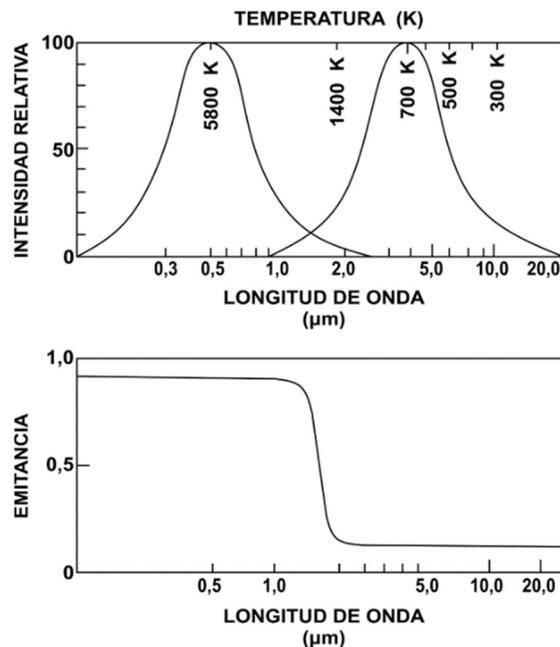


Figura 4-3: Comportamiento de superficies selectivas. Referencia [1].

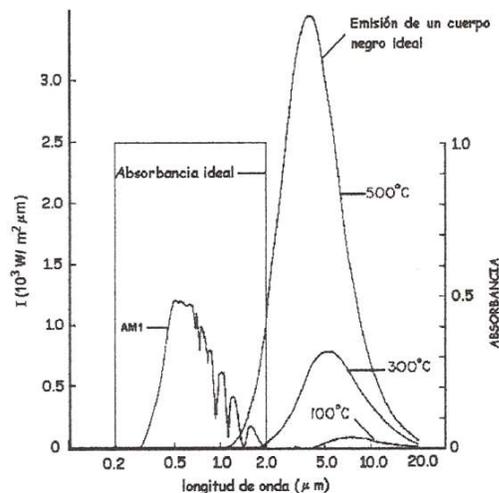


Figura 4-4: Espectro de radiación solar y de emisión de cuerpo negro a tres temperaturas distintas (fuera de escala).

Según el trabajo de referencia [28], si se considera una superficie plana que recibe un flujo de energía (Q), y que tiene una absorbanza solar (α) y una emitancia térmica (ϵ), y que, por una selección apropiada de las condiciones de operación, las pérdidas por conducción y convección son despreciables, el balance térmico está dado por

$$U = \alpha \cdot Q - \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_a^4) \quad (4-3)$$

donde (U) es la energía útil total por unidad de tiempo disponible para realizar un trabajo, (T) es la temperatura de la superficie, (T_a) la temperatura de la atmosfera, y (σ) la constante Stefan-Boltzmann.

Se define la eficiencia de una superficie selectiva [29] como:

$$\eta = U/Q = \alpha - \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_a^4)}{Q} \quad (4-4)$$

Como se mencionó anteriormente, y como resulta de la Ecuación (4-4), la eficiencia de una superficie selectiva no puede expresarse únicamente en función del parámetro $F_s = \alpha / \epsilon$, dado que (η) depende también de (Q) y (T), y variaciones de estos parámetros pueden definir la conveniencia de utilizar una u otra superficie selectiva.

4.2.1 Diferentes tipos de superficies selectivas

Las distintas vías para obtener superficies selectivas son, según Di Lalla [30]:

[28] J.C.Durán y J.A.Moragues. "Análisis de selección de superficies selectivas para temperaturas elevadas". Acta de la 3ª Reunión de Trabajo de ASADES, pag. 205 (1977).

[29] J.A.Duffie y W.A.Beckman. "Solar Energy Thermal Processes". Wiley and Sons, New York. 1975.

[30] Nicolas Di Lalla. Tesis maestría. Desarrollo de un método para la formación de películas selectivas de Cr_2O_3 sobre sustratos de Cu.

1. Selectividad intrínseca
2. Superposición de un material absorbente y otro reflectivo
3. Captura óptica por efecto de texturado superficial
4. Efecto de interferencia utilizando capas de metales y dieléctricos.

A - Selectividad intrínseca

Existen compuestos que poseen características selectivas naturales, que pueden ser metales, óxidos, sulfuros o carburos.

El metal intrínsecamente selectivo más conocido es el tungsteno puro. Entre los óxidos se puede citar el trióxido de molibdeno (MoO_3) dopado con molibdeno, el sulfuro de cobre (Cu_2S) y del plomo (PbS).

Entre los carburos, el más conocido es de hafnio (HfC), que tiene una absorbancia solar de 0,65 y una emitancia térmica de 0,10 a temperatura ambiente.

B - Superposición de semiconductores absorbentes sobre metal muy reflectivo

Existen dos configuraciones básicas, mediante las cuales se obtienen superficies con propiedades selectivas a partir de la superposición de un material absorbente y otro reflectivo.

- a) Una forma es depositar un film transparente a la radiación visible y al infrarrojo cercano y reflectante del infrarrojo lejano sobre un sustrato altamente absorbente de la radiación solar. Se utilizan óxidos metálicos transparentes, como el de indio dopado con estaño ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$), también conocido como ITO, por sus siglas en inglés Indium Tin Oxide, y el dióxido de estaño dopado con flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$).
- b) Otro concepto se basa en depositar un material altamente absorbente de la radiación solar sobre un sustrato de elevada reflectividad infrarroja, o sea, baja emitancia térmica. Estas superficies se obtienen produciendo coberturas superficiales de óxidos metálicos de alta absorbancia sobre metales altamente pulidos de baja emitancia infrarroja como, por ejemplo, óxido de cobre sobre aluminio^[31] y óxido de cobre sobre cobre^[32]. La mayoría de las superficies selectivas se elaboran aplicando este concepto.

La película semiconductor a ser aplicada sobre el metal puede obtenerse a partir de un sulfuro, tal es el caso de (Cu_2S), el que puede ser fácilmente formado sobre un sustrato de cobre.

C - Captura óptica por texturado superficial

Un conveniente texturado superficial puede generar distintos efectos de absorción del espectro visible y reflexión del infrarrojo. Los tipos de geometrías superficiales propuestos

[31] Hottel, H. C. y Unger, T. A., 1959. "The Properties of a Copper Oxide – Aluminum Selective Black Surface Absorber of Solar Energy. Solar Energy 3 (3), 10.

[32] Close, D. J., 1962. "Flat-Plate Solar Absorbers: The Production and Testing of a Selective Surface for Copper Absorber Plates". Report E.D.7, Engineering Section, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia.

para lograr estos resultados pueden ser dendritas, cavidades o poros (ver como ejemplo Figura 4-5). Las estructuras dendríticas tienen generalmente forma de agujas alineadas. Las más conocidas son las de tungsteno.

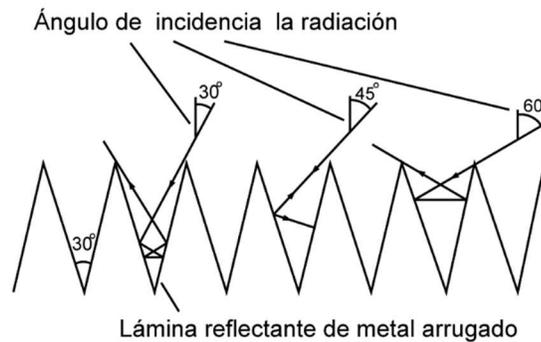


Figura 4-5: Ejemplo de texturación superficial.

D - Efecto de interferencia utilizando capas de metales y dieléctricos

La superposición de dos o más films es ampliamente utilizada para el control de reflexión, transmisión y absorción de ciertas superficies en determinados rangos del espectro electromagnético. Como el control se logra a través del efecto de interferencia generado por las multicapas, se requiere que cada una posea determinadas propiedades y espesores.

La superposición de un metal semitransparente y un dieléctrico sobre un metal, logra el efecto de absorción de los rayos solares y, complementariamente, la reflexión de las otras frecuencias del espectro. Mediante esta vía, por ejemplo, fueron diseñadas, para aplicaciones espaciales a muy alta temperatura (800 °C), superficies consistentes en una superposición cerámico-metal compuesta por una multicapa de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo-Al}_2\text{O}_3$ (AMA).

4.3 ESTRUCTURA ANTIRRADIANTE

Una estructura antirradiante está constituida por una serie de tubos de diferentes formas de material transparente a la radiación solar y opaco al infrarrojo, como, por ejemplo, vidrio o plástico, siendo la que tiene el formato de panel de abeja la más difundida (ver Figura 4-6).

La radiación infrarroja emitida por el convertidor incide en las paredes de las celdas, las cuales la absorben y la remiten en todas las direcciones. Cuanto mayor sea la altura de la celda en relación a su "diámetro", mayor será la proporción de radiación que retorna. En la práctica, para relaciones superiores a ~ 7 , hay que aumentar mucho la altura de las celdas para obtener una ganancia adicional significativa.

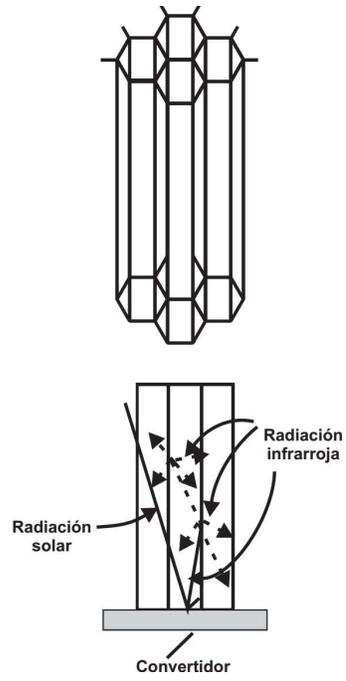


Figura 4-6: Estructura antirradiante.

Se denomina *colector solar plano* al dispositivo encargado de captar la radiación solar y convertirla en energía térmica. El flujo de energía solar a nivel terrestre es, en el mejor de los casos, del orden de 1.000 W/m^2 . Por lo tanto, el análisis de estos colectores presenta problemas particulares de transmisión de calor, caracterizados por flujos pequeños y variables, y una relativa gran importancia de los intercambios por radiación.

Los *colectores planos* en general captan la radiación solar y la convierten en energía térmica sin el empleo de ningún procedimiento que modifique su densidad energética. Funcionan utilizando la radiación solar global, o sea, la directa y la difusa. Hay casos en que se puede realizar un proceso previo con un Concentrador Cilíndrico Parabólico (CPC), para obtener mayor temperatura, pero igualmente se utilizan ambas radiaciones.

Hay varios tipos de colectores planos: de placa plana, con y sin cubierta, tubo de vacío (con flujo directo o con “heat pipe” [tubo de calor]), con concentración y estanque solar playo.

Un colector necesita ser seleccionado cuidadosamente de acuerdo a la temperatura del fluido que debe proporcionar para la aplicación prevista, y de acuerdo al clima del lugar en el cual va a estar emplazado.

Será analizado más detalladamente un colector a placa plana, mencionándose luego, en forma más sucinta, los otros tipos de colectores.

5.1 COLECTOR DE PLACA PLANA

En la Figura 5.1 se muestra el corte y la perspectiva de un colector de placa plana.

Está constituido por:

- a) Cubierta transparente: Puede ser de vidrio, lámina de polietileno o plancha de acrílico, para producir el efecto invernadero y, en algunos casos, es posible ponerse dos cubiertas para incrementarlo. El vidrio, de un espesor mínimo de 4 mm, es el más adecuado por su gran durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales.
- b) Convertidor o placa absorbente o colectora: Una placa plana, que usualmente es metálica (por ejemplo, Cu, Al o Fe), cubierta con material absorbente, que puede ser pintura negra o una superficie selectiva, responsable de absorber y transformar la energía radiante en térmica. También puede ser plástico negro.
- c) Tubos o conductos de circulación: Los conductos que llevan el fluido que se requiere calentar, ya sea líquido o gaseoso, deben estar en buen contacto térmico con la placa absorbente, por soldado o por presión. Pueden ser de cobre, hidrobronce o hierro galvanizado. Por efecto de las pérdidas por fricción, es recomendable que el diámetro interior de las tuberías no sea menor de 10 mm, y el de la tubería-cabezales no menor de 20 mm.

- d) Aislación térmica: En la parte trasera y en los laterales, se coloca un aislante térmico que puede ser polietileno, poliuretano expandido o lana de vidrio, para evitar pérdidas de calor.
- e) Caja: Todo el conjunto va adentro de una caja, responsable de dar rigidez estructural al mismo. Esta debe ser suficientemente hermética para evitar que la humedad y el polvo afecten a los demás componentes.

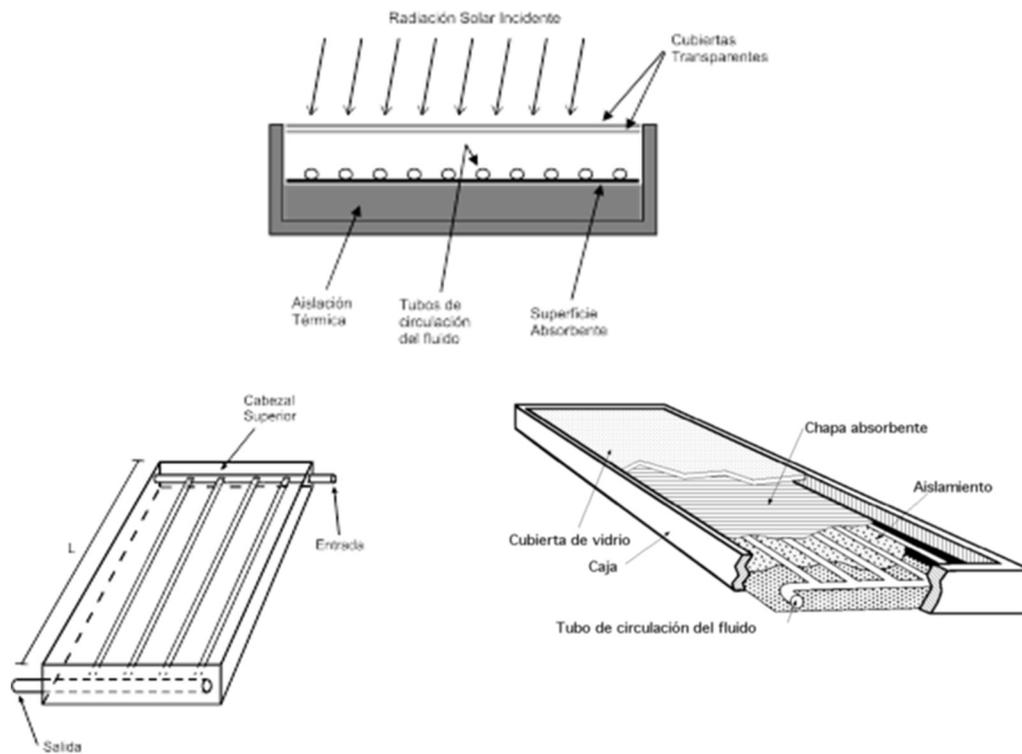


Figura 5-1: Corte y perspectiva de un colector de placa plana. En la figura de abajo a la izquierda no se muestran las tuberías-cabezas soldadas perpendicular a los tubos de circulación en cada extremo, que si se ven en la figura de la derecha.

Este colector permite alcanzar temperaturas de hasta 150 °C, si no se extrae calor. La selección de los materiales y el diseño del conjunto dependen de la temperatura que se quiere alcanzar, del fluido de trabajo y de la duración que se pretende del sistema. Esto debe ser analizado para cada aplicación en particular.

5.1.1 Cubierta transparente

La función de la cubierta transparente, además de permitir el paso de la radiación solar, es actuar como aislante térmico y protectora de los agentes atmosféricos. Deberá soportar efectos mecánicos (vientos, granizo), radiación ultravioleta y erosión por acción del viento. En el caso de colectores con más de una cubierta, la interior deberá soportar ciclos térmicos con temperaturas de hasta 150 °C. Se han probado prácticamente todos los polímeros para reemplazar el vidrio: policarbonatos, poliésteres, polietilenos, Teflón, Tedlar y acrílicos, que

ofrecen características interesantes, pero ninguno garantiza la durabilidad de aquel, y los que se aproximan en eficiencia lo superan en precio.

Esto no invalida el uso de los materiales plásticos como cubierta de los colectores planos, solo se debe prever la necesidad de su reemplazo periódico.

El espesor del vidrio dependerá de la cantidad de “paños” en que esté dividida la cubierta del colector. Si está constituida por un solo paño de aproximadamente 1 m x 2 m, el espesor recomendable será 4,2 mm para vidrio triple común y de 3,8 mm para vidrio doble templado.

En cualquiera de los casos se debe usar vidrio con el menor contenido de óxido de hierro posible, dado que cuanto menor sea este, mayor será la transparencia del vidrio a la radiación solar (transmitancia).

Cuando se utiliza una sola cubierta transparente, la distancia entre esta y la placa colectora será del orden de 25 a 40 mm, conforme Figura 5-2. Cuando sea necesaria doble cubierta, la distancia entre ellas deberá ser de 10 a 15 mm. La separación más conveniente entre chapa colectora y cubierta dependerá, en última instancia, del diámetro y disposición de los conductos de circulación, para minimizar las pérdidas por convección.

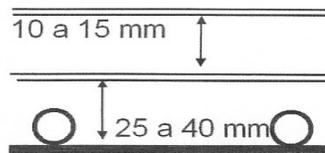


Figura 5-2: Distancia entre cubiertas, fuera de escala.

5.1.2 Placa colectora y tubos o conductos de circulación

La placa colectora es la encargada de absorber la energía solar incidente y, en forma de calor, transferirla al líquido o fluido de trabajo, normalmente agua. Está conformada por la placa absorbidora propiamente dicha y por los conductos de circulación. Para mejorar la captación, la superficie sobre la cual inciden los rayos solares debe tener una alta absorptividad. Esto se logra utilizando pintura negra mate de buena calidad o, en el caso de que el material base lo permita, mediante tratamientos químicos o electroquímicos de la placa absorbidora o agregándole una superficie selectiva. El tipo de revestimiento o tratamiento superficial dependerá también de la cantidad de colectores a producir. Pequeñas series no justifican la inversión necesaria para realizar tales tratamientos.

Aunque hay muchos diseños distintos de placas colectoras, en la mayoría de la producción comercial el fluido circula dentro de tubos que están unidos a la placa absorbidora. Algunos tienen forma de serpentina y otros responden a una estructura de conductos paralelos con dos cabezales, como se puede ver en la Figura 5-3.

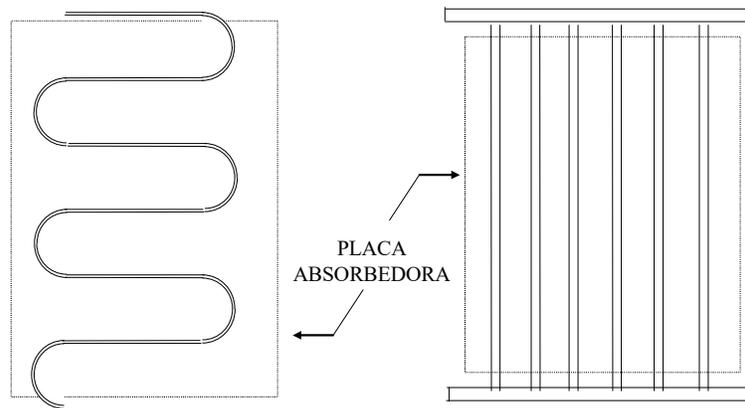


Figura 5-3: Tipos de placas absorbedoras.

Las placas colectoras se han construido de las más variadas formas y tamaños (ver Figura 5-4) y utilizando materiales diversos, como cobre, aluminio, acero y plásticos (polímeros). La elección de los materiales depende de los factores siguientes:

Conductividad térmica: La conductividad térmica de la placa absorbente condicionará, en gran medida, la capacidad de transporte de calor a los tubos y, por lo tanto, el fluido que por ellos circula. Pero esto no significa que un material como el cobre, con una conductancia 8 veces mayor que la del hierro, sea la mejor alternativa. El factor crítico y dominante es el diseño de la placa colector, su espesor, la distribución de los conductos y el tipo de unión entre chapa y tubos. Todos estos factores, entre otros, determinarán la calidad térmica del colector.

Resistencia a la corrosión: Este es un requisito indispensable en la selección del material para los tubos. Debido a que por lo general no se conoce *a-priori* el lugar donde se utilizarán los equipos, es práctica común elegir los que tengan buena resistencia a las aguas aptas para consumo humano, tanto de origen superficial como subterráneo.

Propiedades mecánicas: Características tales como facilidad de doblado, soldado, embutido, cortado, resistencia a ciclos térmicos y a temperaturas de aproximadamente 150 °C, son importantes al seleccionar el material, tanto de los tubos como de la placa absorbente. Estas propiedades no solo tendrán que ver con el producto terminado, sino que definirán el proceso de fabricación.

Otros parámetros: El precio de las materias primas, así como su disponibilidad en los mercados locales y/o la facilidad de reposición, serán también factores a tener en cuenta en la elección de los materiales.

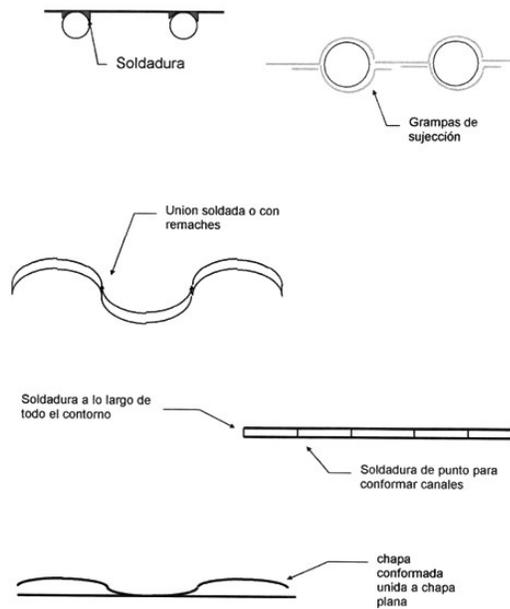


Figura 5-4: Placas colectoras.

En algunos pocos diseños el fluido circula entre dos placas que están firmemente unidas y selladas a lo largo de los bordes, haciendo con que el líquido esté en contacto con prácticamente toda la superficie captadora de la radiación solar. Esta disposición ofrece muy buenas condiciones para la transmisión de calor hacia el fluido, pero tiende a hacer mayor la capacidad térmica del conjunto. Además, es necesario realizar soldaduras en varios puntos entre las chapas, para evitar el “inflado” y dar mayor rigidez al sistema cuando es sometido a la presión de las líneas de alimentación domiciliar de agua.

El cobre es el material más usado para los conductos de circulación. Es la opción más aconsejable por su durabilidad y excelentes propiedades térmicas, y es también un muy buen material para la placa absorbente, pero es caro y por lo tanto hay que minimizar su uso. Una opción intermedia es utilizarlo para los tubos y el aluminio o hierro para la superficie absorbente. En el caso de usar aluminio, el problema es como unir tubos y absorbedor, para que las pérdidas térmicas sean mínimas. Existen varias y probadas soluciones que brindan buena transferencia térmica y durabilidad, algunas de las cuales se muestran en la Figura 5-5.

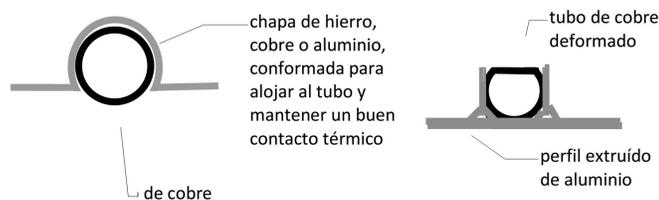


Figura 5-5: Uniones a presión entre tubos y absorbedor.

5.1.3 Aislación térmica

El aislante térmico colocado debajo de la placa colectora y en los laterales, debe reunir las siguientes características: baja conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas (150 °C), ser no-tóxico, no liberar gases, no corroer otros componentes del colector solar, ser poco higroscópico y tener un alto punto de ignición.

Los materiales más utilizados han sido lana de vidrio o lana mineral, espumas rígidas de poliuretano y poli-isocianuratos. El poliestireno expandido, conocido como Telgopor, puede también emplearse, pero siempre combinándolo con otro aislante, dado que su baja resistencia a altas temperaturas hace inadecuado su uso en contacto directo con la placa colectora.

Por lo general el espesor del aislante térmico está ligado al uso que se le dará al colector solar y al tipo de clima en que será mayoritariamente empleado. En climas cálidos y templados y para calentamiento de agua para uso doméstico, un espesor equivalente a 50 mm de lana de vidrio es suficiente.

Cualquier aislación es buena siempre que sus propiedades no se alteren con el tiempo o por la acción de agentes externos. Un caso típico es la lana de vidrio, que al mojarse disminuye muchísimo su resistencia térmica, por lo que deberán ser tomados los recaudos necesarios para protegerla. En esto tendrá mucho que ver el diseño de la caja, el material de la cubierta y los sellos y juntas que se empleen.

5.1.4 Caja

La caja del colector solar debe cumplir la doble función de actuar como elemento de protección y de ser estructuralmente resistente, tanto durante el funcionamiento normal como durante el transporte y el montaje. Debe, además, ser resistente a los agentes atmosféricos, al fuego, a las fluctuaciones térmicas diarias y anuales, a la radiación UV, a los eventuales contaminantes atmosféricos y a la entrada de agua.

Materiales tales como hierro galvanizado o pintado, aluminio extruido y en chapas, plásticos y hasta en algunos casos la madera, han demostrado ser aptos si se respetan las “reglas del arte” en su construcción.

De todos los colectores producidos comercialmente, la gran mayoría emplea cajas construidas en chapa de acero, pintado o galvanizado, o bien con perfiles de aluminio extruido. Este último es muy indicado para la producción de series medianas o grandes, mientras que la chapa doblada presenta mayores ventajas para series pequeñas, pues se evita un costo mayor de matricería. De todos modos, siempre debe analizarse la posibilidad de utilizar perfilería estándar de aluminio, por el menor peso final del producto. Una caja de 1m x 2 m x 0,15 m, hecha en chapa de hierro, ronda los 40 kilos, a lo que deberá agregarse el peso de la placa colectora y el vidrio.

5.1.5 Sellos y burletes

La caja del colector solar debe ser estanca, el ingreso de agua favorece los procesos de corrosión, deteriora la superficie absorbente y puede alterar las propiedades térmicas del aislante. Debe, por lo tanto, ponerse especial cuidado en el diseño del marco soporte de la

cubierta transparente, así como en la selección de los burletes. Los cauchos con base de siliconas son los más utilizados debido a su muy buena resistencia a la radiación UV.

Todas las tuberías de interconexión entre tanque y colectores solares deberán estar aisladas térmicamente y resguardadas contra los agentes atmosféricos, por lo que habrá que utilizar protecciones y poner especial atención en el sellado de uniones y puntos potenciales de ingreso de agua.



*Figurta 5-6: Ejemplo de un colector plano de placa plana con el termotanque.
Referencia [33].*

5.2 OTROS TIPOS DE COLECTORES PLANOS

Serán descritos otros tipos de colectores planos, diferentes al anteriormente analizado, sin profundizar los detalles de su funcionamiento.

5.2.1 Colectores de placa plana sin cubierta

Son colectores simples sin la cubierta para realizar efecto invernadero y sin aislación adicional, de manera que el incremento de temperatura es de unos 10 °C respecto al ambiente. Generalmente los tubos forman parte de la placa absorbedora, y se fabrican por extrusión, siendo el caucho polimérico el material más empleado (ver Figura 5-7). Son utilizados, por ejemplo, para calefacción de piscinas y piscicultura.

[³³] En la Sección 7 se describe la circulación del fluido de trabajo por convección natural y forzada entre los colectores y el termotanque.



Figura 5-7: Colectores de placa plana sin cubierta, de caucho polimérico. Referencia [34].

5.2.2 Colectores de tubos de vacío

Este tipo de colector plano tiene forma de peine y está constituido por un conjunto de cilindros (ver Figura 5-8), cada uno con dos tubos concéntricos construidos con vidrio boro-silicato, soldados en los extremos para que sea posible obtener un vacío alto ^[35] entre ellos (ver Figura 5-9). La pérdida hacia el exterior de estos tubos es muy baja gracias al vacío utilizado.



Figura 5-8: Un colector plano formado por tubos de vacío. Referencia [36].

[34] <https://www.mendoza.conicet.gob.ar/lahv/soft/opte/htdocs/modules/descargas/archivos/COLECTORES%20SOLARES%20PARA%20AGUA%20CALIENTE.pdf>

[35] Vacío del orden de 0,005 pascal.

[36] https://suelosolar.com/guiasolares/colectores_solares.asp

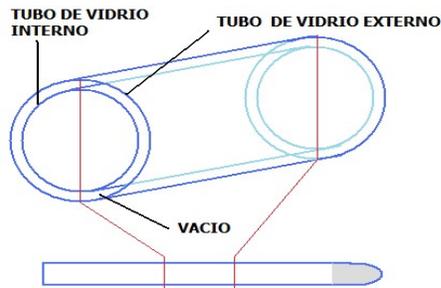


Figura 5-9: Corte de un tubo de vacío. Referencia [37].

Para mantener el vacío por muchos años, en el interior del tubo se coloca un “getter”, sustancia que es capaz de absorber cualquier desprendimiento de gas.

En el centro del tubo está el colector, una plancha de material absorbente que recibe la radiación solar, y por donde circula el fluido de trabajo.

Se puede espejar la parte inferior del tubo externo para que este refleje la radiación que le llega, hacia la plancha absorbente.

Según la forma en que el calor es retirado de la placa que absorbe la radiación solar, se consideran dos tipos de tubos evacuados: de flujo directo y con tubo de calor (“heat pipe”).

5.2.2.1 Tubos evacuados de flujo directo

El tubo de vacío de flujo directo fue el primero en desarrollarse, y su funcionamiento es idéntico al de los colectores solares planos de placa plana, en donde el fluido de trabajo circula por el absorbedor, calentándose a lo largo del recorrido. La placa absorbidora está unida a un caño formado por dos tubos concéntricos; en el interior ingresa el agua fría y por el exterior circula el fluido que eleva su temperatura (ver Figura 5-10).

5.2.2.2 Tubos de vacío con tubo de calor (“heat pipe”)

En la Figura 5-11 se muestra el corte de un tubo de calor (“heat pipe”), donde se produce la siguiente secuencia de operación:

- (1) La radiación solar incide en el absorbedor que se calienta y transmite ese calor al tubo.
- (2) El calor recibido provoca que el fluido en el interior del tubo se evapore y ascienda portando energía (calor latente).
- (3) El fluido evaporado cede su calor latente al fluido más frío que circula por el exterior de la cabeza del tubo, y al hacerlo, se licúa.
- (4) El fluido, de nuevo en estado líquido, cae por gravedad al fondo del tubo para reiniciar el proceso.

[37] <http://www.sitiosolar.com/los-colectores-solares-de-tubo-de-vacio/>

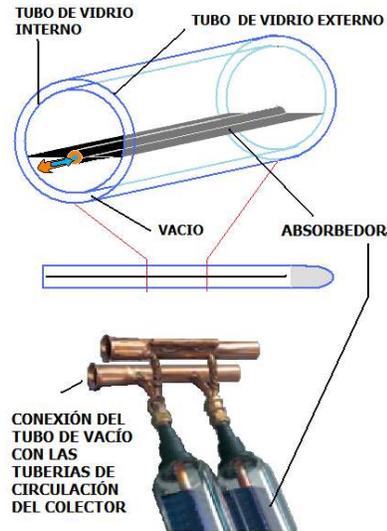


Figura 5-10: Tubo evacuado de flujo directo. El absorbedor está unido a un caño formado por dos tubos concéntricos, funcionando conforme explicado en el párrafo anterior. Referencia [37].

Este sistema es capaz de transmitir el calor con suma eficiencia, muy superior a otros métodos de conducción. Tiene un costo mayor y la velocidad de extracción es más lenta que el tipo flujo directo.

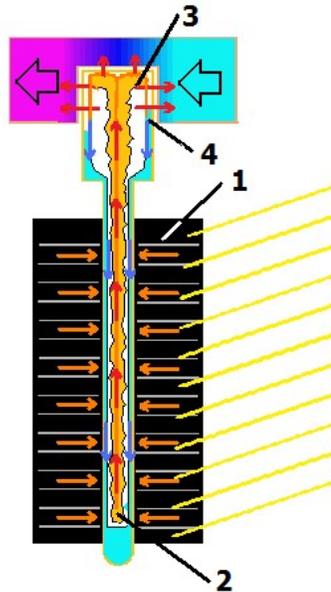


Figura 5-11: Esquema de un tubo de vapor o "heat pipe", cuyo funcionamiento fue descrito en el párrafo anterior. Referencia [37].

En cualquiera de los casos, flujo directo y tubo de calor, uno de los extremos está sellado y el otro está unido a tuberías de conducción del fluido de trabajo (ver Figura 5-12).

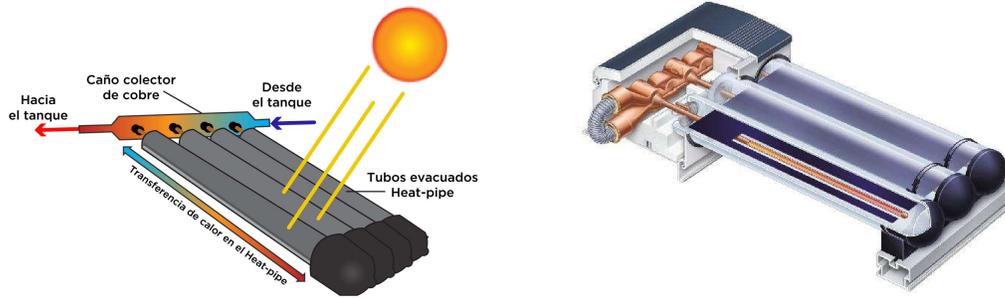


Figura 5-12: Conexión de los tubos de vacío con las tuberías de circulación del colector. Referencias [38][39].

5.2.3 Colectores planos con concentración

Es posible diseñar colectores planos que alcancen temperaturas más elevadas si se incorporan, en su interior, un espejo “Concentrador Parabólico Compuesto – CPC”, que se verá en detalle en la Sección 9.1.

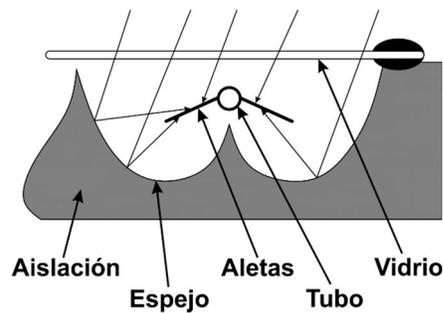


Figura 5-13: Colector plano con un concentrador CPC. Referencia [1].

El receptor de la radiación está conformado por un sistema de caños a los cuales se le agregan dos aletas (ver Figura 5-13) sobre cuya superficie inciden los rayos provenientes del concentrador puesto debajo, que refleja, hacia el conjunto, todo rayo solar que llega con distintos ángulos de incidencia. El área del absorbedor, constituido por las aletas y tubos, tiene una superficie que es menor que la mitad del área del colector. La densidad de energía por unidad de superficie que llega a las aletas es mayor que la que llegaría a un colector de placa plana, visto anteriormente, lo que permite lograr temperaturas más elevadas.

[38] https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_introduccion_a_la_energia_solar-termica_final.pdf

[39] <http://www.lansolar.com/paginas/tubo-vacio-solar-termica.html>



Figura 5-14: Un colector plano con concentración. Referencia [1].

5.2.4 Estanques solares playos

Un caso particular de colector plano es el denominado estanque solar playo, donde el fluido, agua o aire, está dentro de una bolsa de plástico con el fondo negro y la parte superior transparente, colocada en forma horizontal. El efecto invernadero se logra con otra capa de plástico soldada a las anteriores, de las que se mantiene separada por aire a presión, o por otro tipo de cubierta translúcida. En la Figura 5-15 se muestra un dibujo del sistema.

Los estanques solares playos sólo permiten alcanzar temperaturas de 60 a 80 °C. Para aumentar la eficiencia de recolección, se ha propuesto colocar un reflector orientado de este a oeste y mirando el norte o sur según el hemisferio en que se encuentra. De esta manera se simula una inclinación del colector, con lo cual se incrementa el área útil del mismo (ver Figura 5-15- c).

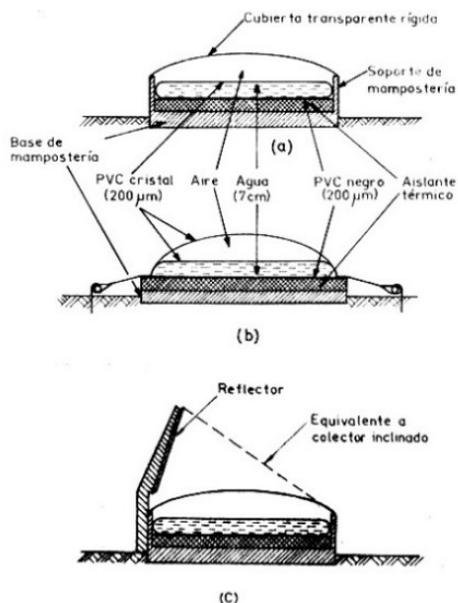


Figura 5-15: Corte de un estanque playo para calentamiento de agua; la cubierta transparente produce el efecto invernadero. (a) y (b) con cubierta

transparente rígida y flexible respectivamente. (c) reflector orientado E-O mirando al norte en Argentina.

6 ANALISIS TERMICO Y EFICIENCIA

6.1 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN UN COLECTOR PLANO

El análisis detallado de un colector plano no es sencillo. Sin embargo, puede realizarse un estudio simplificado que conduce a resultados prácticos muy útiles.

Para poder entender el razonamiento que sigue, es necesario conocer la distribución de temperaturas dentro del colector solar. En la Figura 6-1 está representado un trozo de colector que comprende una zona entre dos tubos.

Parte de la radiación absorbida deberá ser conducida por la placa hacia los tubos y luego al fluido. Por lo tanto, la temperatura en la región central entre dos caños es mayor que aquella en la vecindad de los mismos, que será aproximadamente uniforme debido a la presencia de la soldadura. La energía transferida al fluido hace elevar su temperatura y origina un gradiente térmico en la dirección del flujo.

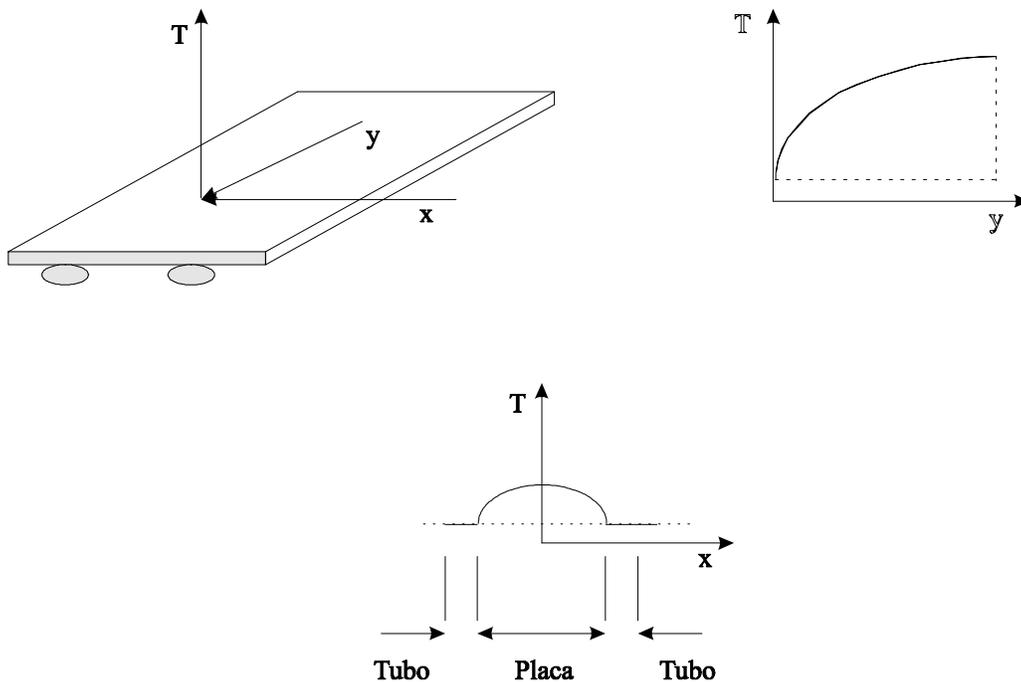


Figura 6-1: Trozo de colector entre dos tubos conductores del fluido de trabajo. Distribución de temperatura en la placa colectora.

Dado que en cada zona del colector el nivel general de temperaturas está regido por aquella local del fluido, es fácil deducir que su distribución responde al esquema de la Figura 6-1.

Para modelizar esta distribución básica, sin quitar rigurosidad al análisis, es necesario introducir algunas hipótesis simplificadoras, las cuales se listan a continuación.

1. Régimen estacionario.
2. Placa colectora con chapa y tubos.
3. La superficie expuesta de los tubos cabezales es despreciable frente al área total del colector.
4. El caudal es uniforme en todos los tubos.
5. La energía absorbida por la cubierta no afecta las pérdidas térmicas del colector.
6. El flujo térmico en las cubiertas es unidimensional.
7. La diferencia de temperaturas entre las dos caras de la cubierta es despreciable.
8. Las cubiertas son opacas a la radiación infrarroja.
9. El flujo térmico a través de la aislación es unidimensional.
10. El cielo puede ser considerado como un cuerpo negro, a los efectos de la radiación térmica del colector.
11. Puede despreciarse el gradiente de temperaturas alrededor de los tubos.
12. El gradiente de temperaturas en la dirección del caudal y entre los tubos puede analizarse independientemente.
13. Las propiedades de los materiales constructivos son independientes de la temperatura.
14. La temperatura del aire que rodea el colector es uniforme.
15. La cubierta del colector no está sucia.
16. No hay sombras que se proyectan sobre el colector.

6.2 BALANCE TÉRMICO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO

En un colector plano, según el principio de conservación de la energía, la que ingresa en un período determinado debe ser igual a la que egresa, ya sea en forma de calor útil o como pérdidas térmicas, más la que pudiese quedar almacenada en el colector. Esta igualdad puede expresarse del siguiente modo ^[40] :

$$Q_a = Q_u + Q_p + Q_{al} \quad (6-1)$$

donde:

Q_a = energía solar absorbida por la placa colectora

Q_u = calor (energía) útil extraído por el fluido

Q_p = pérdidas térmicas

Q_{al} = calor almacenado en el colector

[40] <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=3>

Generalmente, por razones de simplicidad, se acostumbra realizar el balance térmico del colector en condiciones estacionarias^[41], anulándose el último término de la Ecuación 6-1, que se reduce a:

$$Q_a = Q_u + Q_p \quad (6-2)$$

La energía solar absorbida por el colector solar plano puede expresarse como:

$$Q_a = \tau \alpha I_s A_c \quad (6-3)$$

siendo:

Q_a = energía solar absorbida por la placa colectora (W)

τ = transmitancia de la cubierta (adimensional)

α = absorbanza de la placa colectora (adimensional)

I_s = radiación solar global incidente sobre el plano del colector (W/m²)

A_c = área del colector (m²)

Las pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción pueden expresarse como:

$$Q_p = A_c \cdot U_L \cdot (t_p - t_a) \quad (6-4)$$

donde:

Q_p = energía térmica perdida (W)

U_L = coeficiente global de pérdidas térmicas del colector (W/(m²·°C)). Representa la energía por unidad de tiempo y área que se pierde debido a la diferencia de temperatura entre la placa y el medio ambiente

T_p = temperatura media de la placa (°C)

t_a = temperatura ambiente (°C)

La Ecuación 6-2, tomando en cuenta las Ecuaciones 6-3 y 6-4, puede ser reescrita como:

$$\tau \cdot \alpha \cdot A_c \cdot I_s = Q_u + A_c \cdot U_L \cdot (t_p - t_a) \quad (6-5)$$

Reagrupando términos:

$$Q_u = A_c \cdot (\tau \cdot \alpha \cdot I_s - U_L \cdot (t_p - t_a)) \quad (6-6)$$

expresión que permite calcular la energía útil obtenible de un colector solar plano trabajando en régimen estacionario.

[41] Se mantiene constante las temperaturas de entrada y salida del fluido y la ambiente, el caudal, la radiación solar y todos los parámetros que afectan el funcionamiento del colector.

El problema que presenta esta ecuación es que la temperatura media del colector es difícil de medir o de calcular, una vez que depende de diversos factores, tales como el diseño, las características constructivas del colector, la radiación incidente y la temperatura de entrada del fluido de trabajo. Razones prácticas hacen aconsejable reformular la Ecuación 6-6 y expresarla en función de parámetros o variables que puedan ser medidos o calculados analíticamente a partir de principios básicos, como veremos más adelante.

6.3 COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS DEL COLECTOR

Las pérdidas térmicas de un colector solar tienen lugar mediante las tres vías posibles de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Los cálculos de la energía útil y del rendimiento se simplifican enormemente al representarlas a través de un único factor, introducido en la Ecuación 6-6, denominado “coeficiente global de pérdidas térmicas del colector (U_L)”, por unidad de área y de temperatura, formado por la Ecuación empírica ^[42].

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (6-7)$$

donde:

$U_t =$ coeficiente de pérdidas por la cara superior del colector ($W/m^2\text{°C}$)

$U_b =$ coeficiente de pérdidas por la parte posterior del colector ($W/m^2\text{°C}$)

$U_e =$ coeficiente de pérdidas por los laterales del colector ($W/(m^2\text{°C})$)

Las pérdidas por la parte posterior y laterales del colector están restringidas esencialmente por el aislante térmico, por lo tanto, los coeficientes de las mismas pueden representarse mediante las expresiones ^[42].

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (6-8)$$

$$U_e = \frac{k \cdot A_e}{e \cdot A_c} \quad (6-9)$$

donde:

$k =$ conductancia del aislante térmico ($W/(m\text{°C})$)

$L =$ espesor del aislante posterior (m)

$e =$ espesor del aislante lateral (m)

$A_e =$ superficie lateral de la caja del colector solar (m^2)

$A_c =$ superficie de la placa colectora (m^2)

Las pérdidas por la cara superior del colector son las más complicadas de analizar, pues son el resultado de la superposición de, esencialmente, dos mecanismos de transporte de calor.

^[42] DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons.

La placa colectora al calentarse con radiación solar, emite infrarrojo que, por las hipótesis introducidas, es absorbido totalmente por la cubierta (efecto invernadero). Por otra parte, la cubierta transfiere calor por radiación y convección natural al colector y al ambiente. También a este último por convección forzada (viento). Las expresiones ^[43] que permiten calcular este intercambio de energía son:

Entre placa y cubierta:

$$q_{pc} = h_{pc} \cdot (T_p - T_c) + \frac{\sigma \cdot (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (6-10)$$

Entre cubierta y el medio ambiente:

$$q_{ca} = h_w \cdot (T_c - T_a) + \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_s^4) \quad (6-11)$$

donde:

q_{pc} = intercambio de energía por convección y radiación entre placa y cubierta por unidad de área del colector (W/m^2)

q_{ca} = intercambio de energía por convección y radiación entre cubierta y el medio ambiente por unidad de área de colector (W/m^2)

h_{pc} = coeficiente de transmisión de calor por convección entre placa y cubierta (W/m^2K)

h_w = coeficiente de calor por convección desde la cubierta al aire, fuertemente dependiente de la velocidad del viento (W/m^2K)

T_a = temperatura del aire (K)

T_c = temperatura media de la cubierta (K)

T_p = temperatura media de la placa colectora (K)

T_s = temperatura equivalente del cielo (K)

σ = constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m^2K^4)

ε_p = emitancia de la placa (adimensional)

ε_c = emitancia de la cubierta (adimensional)

Como el flujo térmico es unidimensional en la cubierta, la energía que le llega desde la placa debe necesariamente ser igual a la transferida al medio ambiente. Por lo tanto:

$$q_{ca} = q_{pc} \quad (6-12)$$

Teniendo en cuenta esta igualdad y las Ecuaciones (6-10) y (6-11) se puede llegar a que el coeficiente de pérdidas por la cubierta está dado por:

[43] <http://www.marioloureiro.net/ciencia/EnerSolarTermica/SolarPROCESOSTERMO/Solar3%20.pdf>

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{pc} + h_{pc,r}} + \frac{1}{h_w + h_{ca,r}} \right]^{-1} \quad (6-13)$$

donde:

$$h_{pc,r} = \sigma \cdot \frac{(T_{pc}^2 + T_{ca}^2) \cdot (T_p - T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \epsilon_c - 1}$$

$$h_{ca,r} = \sigma \cdot (T_c^2 + T_s^2) \cdot (T_c + T_s)$$

son los coeficientes de pérdida por radiación de la placa a la cubierta y de esta al ambiente, respectivamente.

Con estas ecuaciones pueden estimarse las pérdidas convectivas y radiactivas de un colector solar, debiéndose para ello proceder por aproximaciones sucesivas.

6.4 ECUACIÓN CARACTERÍSTICA DEL COLECTOR SOLAR PLANO; EFICIENCIA

La eficiencia de conversión de estos colectores, o sea, la relación entre la energía solar que incide sobre ellos y la energía térmica que podemos disponer, depende de la temperatura alcanzada por el fluido de trabajo, más precisamente su valor promedio de entrada y salida al colector. Como una regla general, la eficiencia del sistema aumenta cuando la temperatura media disminuye, dependiendo de la velocidad con que circula. Si no se utiliza el fluido, llegará un momento en que la circulación es nula, habiéndose alcanzado un equilibrio entre la radiación solar que llega y las pérdidas de energía térmica por conducción, convección y radiación. La extracción de calor y la eficiencia, en ese caso límite, es cero. Por otro lado, si se emplea mucho líquido, hay una gran extracción de calor, baja la temperatura promedio a valores cercanos al ambiente y la eficiencia térmica se aproxima al 80 %. En la práctica no se tiene ninguno de esos casos extremos.

La Ecuación 6-6, como dijimos anteriormente, es poco práctica pues está expresada en función de la temperatura de la placa colectora, la cual es difícil de determinar si no se conocen las características constructivas del equipo y sus condiciones de funcionamiento. Se recurre a un artificio que consiste en expresar la energía útil en función de la temperatura media del fluido e introducir un factor correctivo:

$$Q_u = F' \cdot A_c \cdot [\tau \cdot \alpha \cdot I_s - U_L \cdot (t_m - t_a)] \quad (6-14)$$

donde:

F' = factor de eficiencia del colector (adimensional)

t_m = temperatura media del fluido = $(t_e + t_s)/2$ (°C)

t_e = temperatura de entrada del fluido al colector (°C)

t_s = temperatura de salida del fluido del colector (°C)

t_a = temperatura ambiente (°C)

$A_c =$ superficie de la placa colectora (m^2)

$U_L =$ coeficiente global de pérdidas térmicas del colector ($W/m^2\text{°C}$)

Si se divide ambos miembros de la Ecuación 6-14 por la energía solar incidente $A_c \cdot I_s$ sobre el colector, obtendremos su rendimiento:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_s} = F' \cdot \tau \cdot \alpha - F' \cdot U_L \cdot \frac{(t_m - t_a)}{I_s} \quad (6-15)$$

que también puede ser expresado, introduciendo un nuevo factor correctivo, como:

$$\eta = F_R \cdot \tau \cdot \alpha - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(t_e - t_a)}{I_s} \quad (6-16)$$

en este caso (F_R) es el factor de remoción de calor, cuya cantidad adimensional es menor que uno y se puede obtener analítica o experimentalmente, ya que no todo el calor pasa al fluido, dejando una cierta fracción en la superficie absorbedora. Estas expresiones son particularmente útiles cuando se dimensionan instalaciones, ya que la temperatura de salida del colector es difícil de estimar por depender de las condiciones climáticas y del caudal, mientras que la de entrada es, por lo general, conocida.

Dentro del rango de temperaturas en que operan los colectores solares, los productos ($F' \cdot \tau \cdot \alpha$), ($F_R \cdot \tau \cdot \alpha$), ($F' \cdot U_L$) y ($F_R \cdot U_L$) son prácticamente constantes, permitiendo representar el rendimiento como la ecuación de una recta cuya variable independiente será $(t_e - t_a)/I_s$ o $(t_m - t_a)/I_s$, según sea la temperatura característica que se elija.

En la Figura 6-2 se representan esquemáticamente las Ecuaciones (6-15) y (6-16). La ordenada al origen de la recta de eficiencia será representativa de las pérdidas ópticas y la pendiente demostrará las pérdidas térmicas.

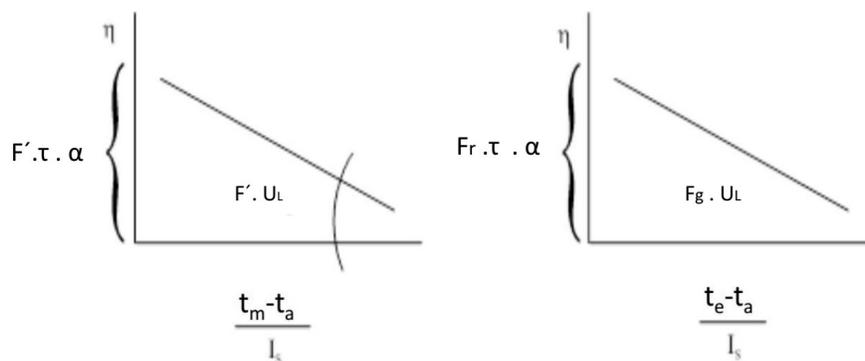


Figura 6-2: Representación gráfica de las Ecuaciones (6-15) y (6-16).

Para determinar la eficiencia de un colector solar, se realizan ensayos normalizados en condiciones de régimen estacionario. En la argentina se siguen los procedimientos establecidos en las normas IRAM 210 002-1 y IRAM 210 004, donde se detallan las

condiciones en que deben ser hechos estos ensayos, las características del instrumental de medición y la forma de presentación de los resultados.

En la Figura 6-3 se presenta la eficiencia de tres tipos de colectores planos: sin cubierta, con una cubierta y de tubo de vacío.

Es importante destacar que la elección de un colector solar debe ser hecha en función de las condiciones operativas. Se debe tener en cuenta que la variable independiente en abscisas representa "puntos de trabajo" del equipo y será necesario, por lo tanto, conocer en qué contexto operará un sistema para poder seleccionarlo adecuadamente. Por ejemplo, en el caso de sistemas para calentamiento de piletas de natación, donde la elevación de temperatura rara vez supera los 5 °C, es recomendable utilizar colectores sin cubierta, mucho más baratos y con buen rendimiento para valores $(t_e - t_a)/I_s$ o $(t_m - t_a)/I_s$ menores a $0,02 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$. Por el contrario, en el caso de calentamiento de agua para uso doméstico, la diferencia entre la temperatura del fluido en el colector y del ambiente puede llegar a 50-60 °C, haciendo necesario el empleo de una o más cubiertas. Para temperaturas mayores, es recomendable usar un colector de tubo de vacío.

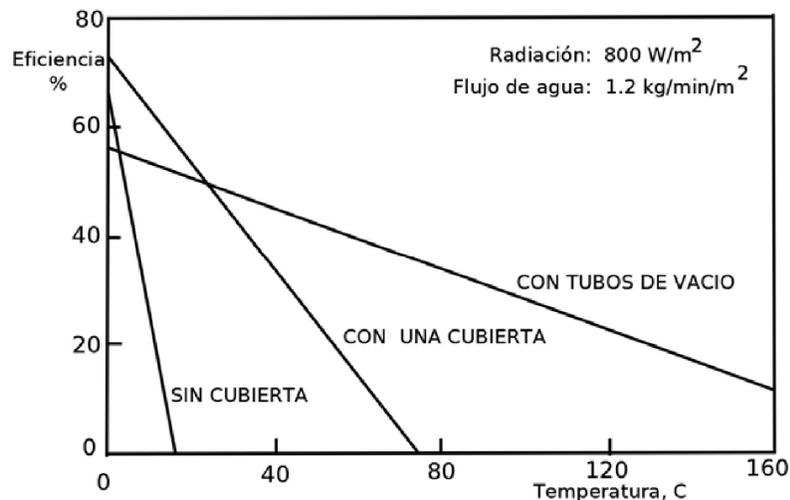


Figura 6-3: Eficiencia de tres tipos de colectores planos en función del salto de temperatura conforme la referencia [1].

7 SISTEMA COLECTOR-TERMOTANQUE

Se analizará el funcionamiento del sistema integral que utiliza un termotanque. La circulación del fluido de trabajo entre este y el colector solar se logra, según el tipo de aplicación, por dos caminos: convección natural o forzada.

7.1 CONVECCIÓN NATURAL

En la Figura 7-1 se muestra un diseño del sistema que emplea la *convección natural o termosifón* para el funcionamiento del conjunto, considerándose que el termotanque debe estar por encima del colector.

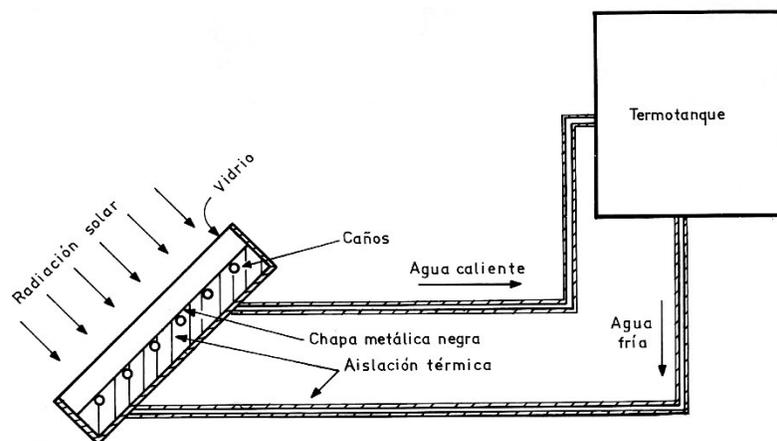


Figura 7-1: Circulación entre el colector y el tanque por termosifón.

El fluido de trabajo, al calentarse en contacto con la placa absorbedora, disminuye su densidad y asciende hacia el tanque de acumulación, cuyo líquido está más frío, tiene mayor densidad y desciende hacia el colector, produciéndose una circulación continua sin necesidad de elementos mecánicos. Este sistema, por ser el de menor costo y no tener partes móviles, es el más empleado para calentamiento de agua en casas donde las superficies de los colectores son pequeñas. Su funcionamiento se auto regula y durante la noche el fluido dentro del colector está más frío que el del tanque, por lo que la circulación por termosifón se interrumpe. Su caudal, aún en condiciones de máxima radiación, es de aproximadamente 1 litro por minuto y por cada metro cuadrado de superficie colectora.

El termotanque, o tanque de acumulación, es el encargado de almacenar el agua caliente para su posterior utilización. Será necesario, por lo tanto, que tenga una muy buena aislación térmica.

El tamaño del tanque dependerá de la cantidad de colectores solares a ser instalados y del tipo de consumo. Por lo general se adoptan formas cilíndricas que pueden estar dispuestas horizontal o verticalmente. Ver Figura 7-2.

En principio, para la construcción del tanque puede utilizarse cualquier material que tenga buena resistencia a la corrosión, soporte presiones de uno a cinco atmósferas y temperaturas máximas de 100 °C. Asimismo, debe preverse una estructura que, además de tolerar el peso del tanque lleno, resista la acción de los vientos.

Uno de los detalles más importantes al diseñar el termotanque es la ubicación de los caños del agua que circulará por los colectores, así como la entrada de agua fría proveniente de la red y la salida de ésta caliente para el consumo. Dentro del tanque, como resultado de la diferencia de densidades, el agua se estratificará de modo tal que el segmento superior estará a mayor temperatura que el inferior. Por esta razón, el agua caliente para su uso se extrae de la zona superior, mientras la fría ingresa por la parte baja, evitando que las capas se mezclen. Las distribuciones más utilizadas son las de la Figura 7-3, manteniéndose las proporciones en el caso de colocarse el tanque horizontalmente.

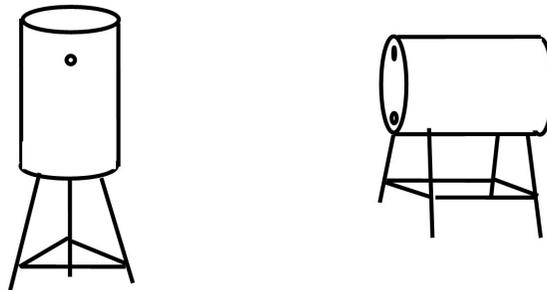


Figura 7-2: Ubicación de tanques.

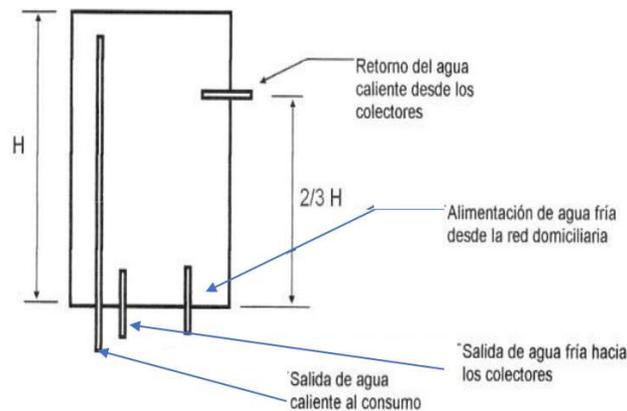


Figura 7-3: Entrada y salida de agua.

En la Figura 7-4 se muestra el detalle de un tanque de almacenamiento, compuesto por estos ítems:

1. Tanque
2. Tubería de suministro de agua fría desde línea de abastecimiento.

3. Tubería de suministro de agua a baja temperatura al colector solar.
4. Tubería de agua caliente proveniente del colector solar.
5. Tubería de agua caliente para consumo.
6. Válvula de seguridad y desfogue.
7. Tubería para pruebas térmicas y válvula eliminadora de aire.
8. Aislación térmica.
9. Cubierta protectora del tanque y la aislación.
10. Patas soporte.

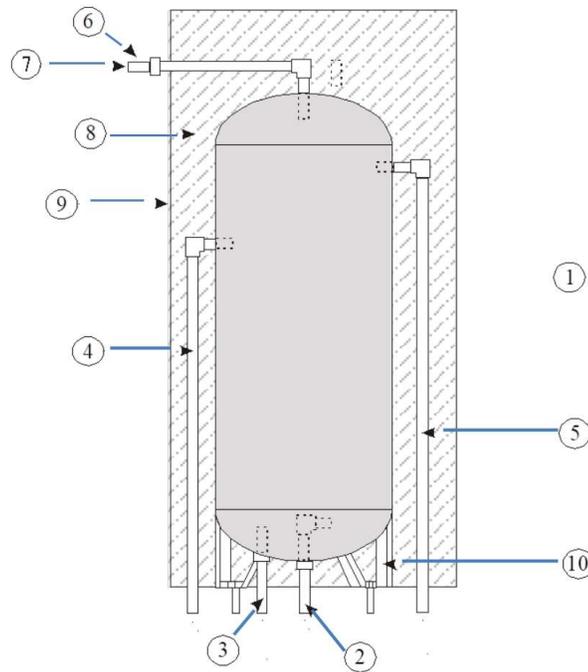


Figura 7-4: Esquema del tanque de almacenamiento.

Para lograr un buen rendimiento de la instalación, es muy importante que todos sus componentes estén bien aislados térmicamente. Se recomienda la utilización, para el tanque, de espesores de por lo menos 50 mm de lana de vidrio o su equivalente, y no menos de 25 mm para las cañerías, tanto las de interconexión con los colectores como las de bajada de agua caliente. En el colector solar propiamente dicho, el espesor de aislante no deberá ser menor que 50 mm en la parte posterior y 25 mm en las laterales.

En la Figura 5-6 se mostró un ejemplo de colector plano conectado por termosifón a un termotanque.

Cuando se utilizan colectores planos para calentamiento de líquidos en zonas donde la temperatura nocturna se acerca a su punto de congelamiento, es necesario utilizar un fluido intermedio, como por ejemplo agua con anticongelante, y un intercambiador de calor, o bien vaciar el sistema durante la noche.

Para las diversas aplicaciones, los colectores planos se instalan sobre una plataforma fija, de inclinación variable, orientada según el hemisferio, y con el ángulo acorde a la latitud y época del año, para recibir la mayor cantidad de energía solar posible (ver Figura 7-5).

El ángulo de inclinación del plano del colector respecto del horizontal está dado por la relación:

$$\theta = |\text{latitud-declinación}|^{[44]}$$

donde la declinación es el ángulo que forma la eclíptica con el plano ecuatorial (ver Figura 7-6).

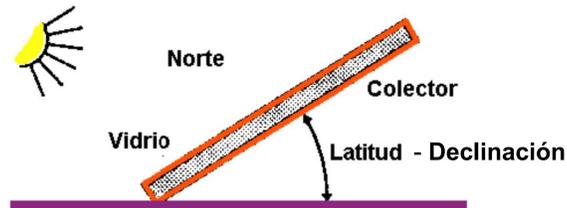


Figura 7-5: Ángulo de inclinación del plano del colector solar respecto del plano horizontal (hemisferio sur).

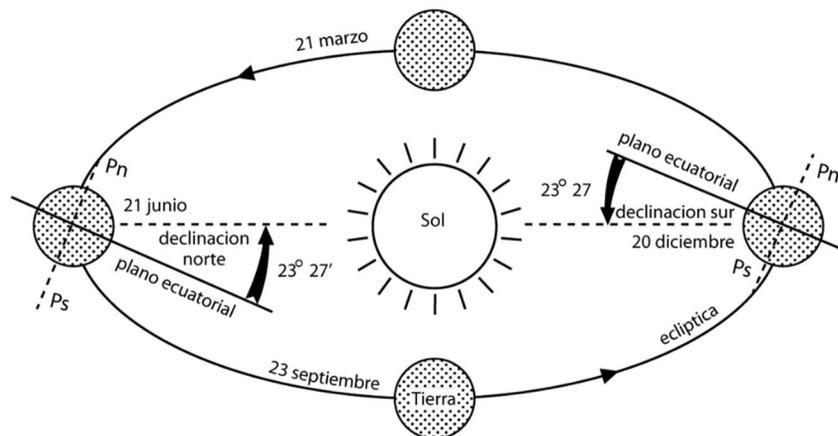


Figura 7-6: Declinación Solar. El ángulo formado por el plano ecuatorial con la eclíptica y la recta que une los centros de la Tierra y el Sol, cambia entre $+23.45^\circ$ y -23.45° .

En la práctica se da una inclinación promedio al ángulo del colector para dejarlo fijo todo el año; en algunas aplicaciones especiales, se puede realizar un ajuste estacional, con un valor medio para cada estación, si bien la inclinación del Sol varía en forma continua. Para el hemisferio sur, la orientación es con el frente del colector hacia el norte; para Buenos Aires (latitud $34,5^\circ$) la inclinación estacional sería de 22 grados durante los tres meses de verano, 46 grados durante los de invierno y 34 grados para primavera y otoño.

[44] La latitud y la declinación se toman en valores absolutos, o sea, sin signo, cualquiera sea el hemisferio en que se encuentre el colector.

7.2 CONVECCIÓN FORZADA

Cuando la superficie colectora es grande o el tanque de acumulación se encuentra por debajo del colector, se utiliza una bomba para la circulación del líquido (ver Figura 7-7), que se regula controlando su temperatura a la salida del colector y dentro del tanque, mediante un circuito electrónico que automáticamente arranca o detiene la bomba.

En grandes instalaciones se utilizan dos circuitos (ver Figura 7-8), uno primario, que une los colectores al tanque de acumulación, y uno secundario, donde circula el agua para consumo. En estos casos el fluido del circuito primario puede tener un anticongelante para las horas de muy baja temperatura ambiente.

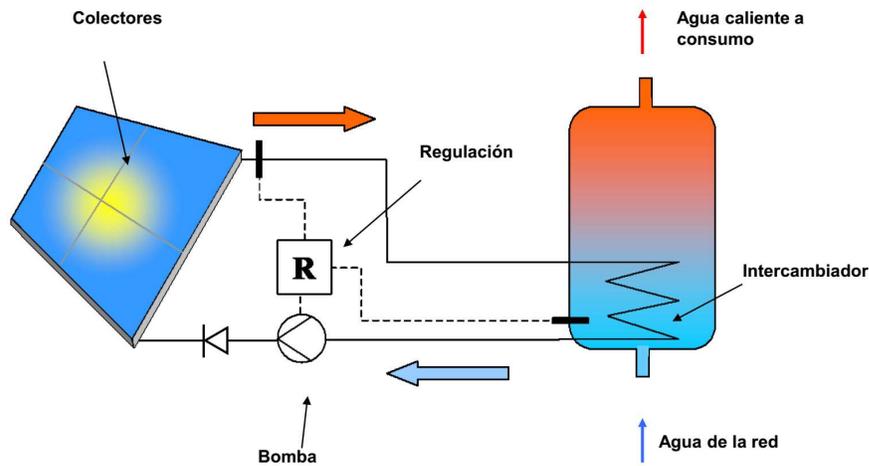


Figura 7-7: Sistema de circulación forzada.

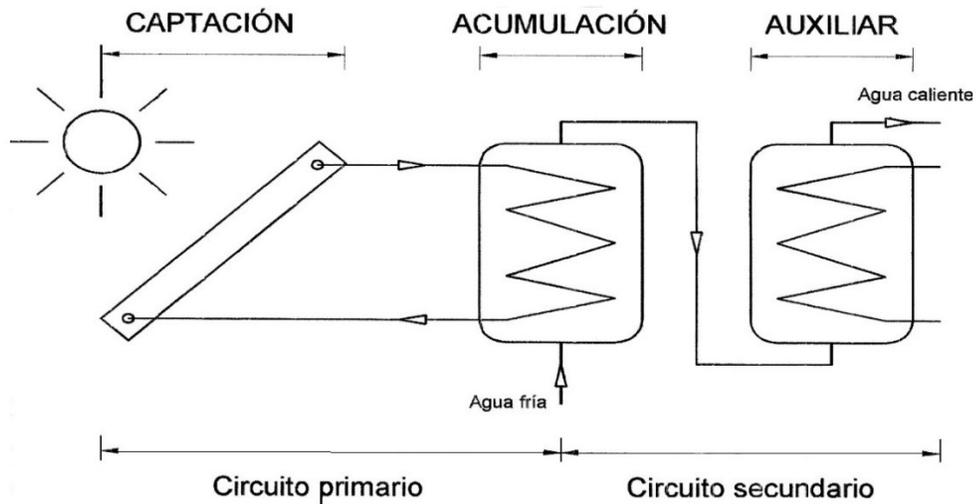


Figura 7-8: Sistema de calentamiento de agua con circuito secundario.

8.1 INTRODUCCIÓN

A través de procesos ópticos, utilizando espejos o lentes, los concentradores permiten incrementar la intensidad de la radiación solar, o sea, aumentar la densidad de energía por unidad de área, y obtener temperaturas elevadas. Un ejemplo extremo lo constituye el horno solar de Odeillo, que veremos en detalle en la Sección 9.9, ubicado en los Pirineos Franceses, el cual permite alcanzar temperaturas de $3.400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.673 K) al mediodía solar.

Por tratarse de sistemas ópticos, funcionan con la radiación solar directa, perdiéndose toda la difusa. Esta misma característica hace que deban estar montados sobre equipos que les permitan seguir el movimiento aparente del Sol, a fin de optimizar, en cada momento, la posición de la superficie reflectora respecto a la dirección de los rayos incidentes y mantenerlo enfocado. Una excepción es el concentrador parabólico compuesto-CPC, que puede concentrar radiación directa y una fracción de difusa, como se verá en Sección 9.1.

Se componen de dos partes fundamentales, el concentrador propiamente dicho y el receptor, cuyo ejemplo se podrá ver en la Figura 8-1. El primero es la parte del colector que refleja, si es un espejo, o refracta, si es una lente, la radiación solar que incide sobre ellos, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo.

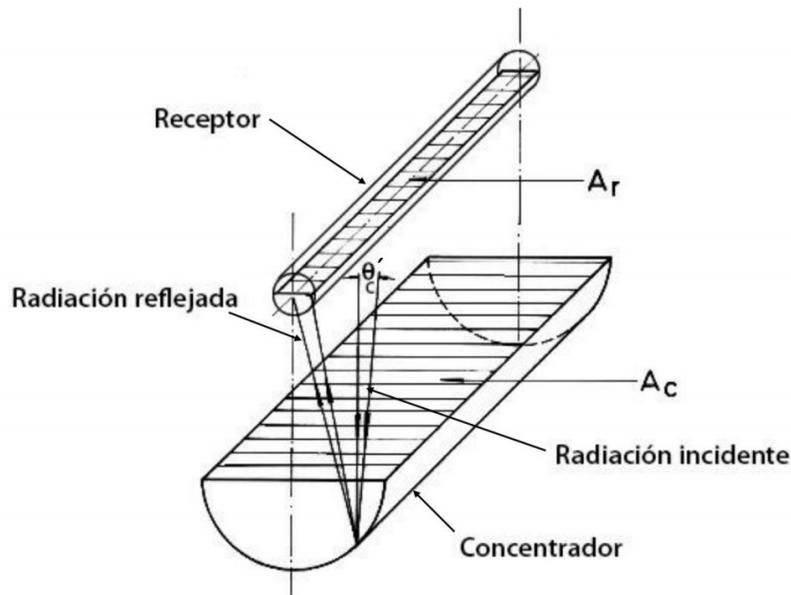


Figura 8-1: Componentes de un concentrador cilíndrico parabólico, donde se indica el concentrador, el receptor, la radiación incidente y reflejada, el semiángulo θ_c' (proyección del ángulo de apertura del disco solar θ_c , ver Figura 8-2), el área de apertura del concentrador A_c y el área del receptor A_r .

Para simplificar el análisis, se considera en general un contexto en dos dimensiones, donde los rayos solares que inciden y los reflejados se encuentran en un plano

perpendicular al de apertura que contiene el eje de rotación (ver Figura 8-3). Los rayos solares no son perfectamente paralelos, dado que llegan a la tierra provenientes de los extremos del disco solar y de zonas intermedias (ver Figura 3-1); luego, el ancho de área del receptor (en la Figura 8-1) está dado por el semiángulo (θ_c'), que, como demostraron R.O Nicolás y J.C Durán ^[45], es:

$$\theta_c' = \theta_c / \cos k$$

siendo:

θ_c = semi apertura del disco solar (16 minutos)

k = ángulo entre la dirección del haz de rayos que provienen del sol y su proyección sobre el plano normal a la línea focal del concentrador (ve Figura 8-2)

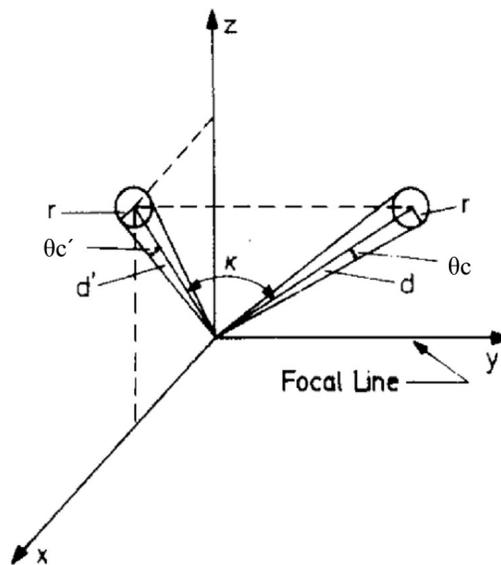


Figura 8-2: Modificación del semiángulo de apertura solar θ_c al considerar el centro del Sol contenido en un plano (P) perpendicular a la línea focal del concentrador, donde el ángulo (k) se define por el rayo procedente del centro del Sol y el plano (P), (r) es el radio del sol y (d) la distancia Sol-Tierra (adaptado de referencia [45]).

Para describir las características de estos sistemas, normalmente se considera el semiángulo de apertura del disco solar, la temperatura de operación y el factor de concentración, donde este último es el parámetro más importante. En la Sección 8.2 se definen los diferentes tipos, siendo el más empleado el geométrico (C_g), definido como la razón del área de apertura del concentrador (A_c) y el área del receptor (A_r), siendo las pérdidas térmicas de este, en una buena aproximación, proporcionales a dicha área (ver Figura 8-1).

[45] R.O.Nicolás y J.C. Durán. "Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators". Solar Energy 25, 21 (1980).

$$C_g = \frac{A_c}{A_r} \quad (8-1)$$

Un factor a tener en cuenta es la orientación del colector y el mecanismo apropiado que permita hacer un seguimiento lo más preciso posible del movimiento aparente del Sol, lo que implica, en la mayoría de los casos, tener que hacer uso de más de un sistema de rotación.

Así, un concentrador cilíndrico parabólico debe tener un dispositivo que permita que su vector unitario (\vec{n}), perpendicular a la superficie de abertura (ver Figura 8-3) y el vector unitario solar (\vec{s}), conformen un plano que coincida con el plano focal, que a su vez sea de simetría del concentrador y que, por lo tanto, contenga al receptor. Con este montaje es posible obtener giros del colector en un sólo eje, que puede estar orientado en la dirección norte-sur o este-oeste, o inclinado y paralelo al eje de la Tierra, con velocidad de giro de 15° por hora, como se verá en detalle en la Sección 9.5.

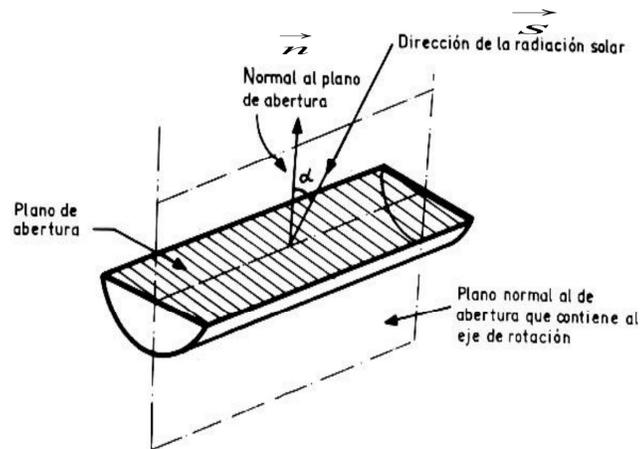


Figura 8-3: Concentrador cilíndrico parabólico. Se indican vector unitario \vec{n} normal a la superficie de abertura y el vector unitario solar \vec{s} , así como el plano perpendicular al de abertura que contiene al eje de rotación.

Sin embargo, el seguimiento perfecto del Sol se conseguirá cuando los vectores (\vec{n}) y (\vec{s}) coincidan, ya que en esas circunstancias, la superficie de abertura del colector será perpendicular a los rayos solares incidentes; este montaje requiere la composición de dos giros sobre un eje vertical y otro horizontal, lo que se conoce como Alt-acimut; existen otros tipos de movimientos relativos, pero el vector unitario perpendicular (\vec{n}) al plano de abertura siempre tiene que coincidir con la dirección de los rayos solares definida por el vector unitario (\vec{s}).

En la práctica esto encarece el sistema de movimiento, por lo que los concentradores denominados "lineales", que serán definidos en los párrafos siguientes, emplean un solo grado de rotación, pero para los de "dos dimensiones" es necesario utilizar el Alt-acimut.

Los concentradores se clasifican en dos tipos, lineales y de dos dimensiones, ambos preparados para seguir el desplazamiento aparente del sol. Serán analizados cuatro tipos de concentradores lineales, que disponen de un solo grado de movimiento: cilíndricos parabólicos, fijos a espejo facetado, múltiples espejos cóncavos giratorios, con sus ejes dispuestos sobre un plano (Concentrador Fresnel Lineal) y múltiples espejos cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un cilindro. Se tiene también otro tipo, denominado concentrador lineal parabólico compuesto, que necesita sólo ajustes periódicos. Por otra parte, también serán examinados cuatro tipos de concentradores de dos dimensiones y dos grados de movimiento: lentes de Fresnel, fijo semiesférico, de torre central y paraboloide de revolución.

También pueden ser divididos en dos otros grupos: en el primero el receptor está conformado por muchas unidades, en cada una de las cuales se produce la conversión de la energía solar a térmica (conversión distribuida); en el segundo, la energía solar incidente sobre una gran superficie se concentra en un solo receptor central (conversión centralizada). En la Figura 8-4 se muestra ejemplos de las clasificaciones mencionadas.

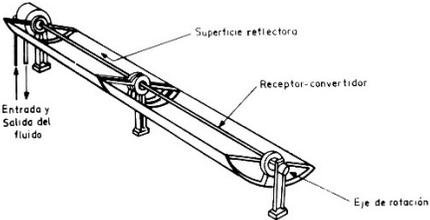
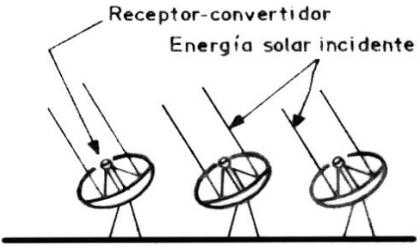
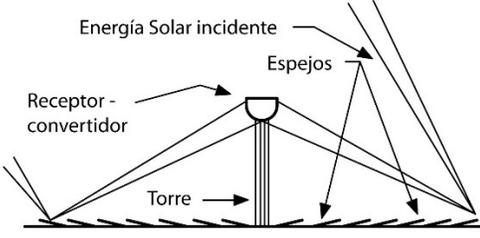
Concentradores	Dimensión	Tipo de conversión	Ejemplo
	Una (lineal)	Distribuida	Colector cilíndrico parabólico
	Dos		Colector paraboloide de revolución
		Centralizada	Receptor o Torre central

Figura 8-4: Concentradores cilíndrico parabólico, paraboloide de revolución y torre central.

El uso de concentradores para calentamiento de fluidos a temperaturas intermedias (100-600°C) y altas (500-1.000 °C), e incluso mayores, como el caso del horno solar de Odeillo que alcanza los 3.400 °C, ofrece una amplia gama de aplicaciones de la energía solar en diferentes campos, tales como cocinas, bombeo de agua, hornos, generación de electricidad en general y otros procesos industriales. En este libro no se va a discutir los distintos empleos, algunos de los cuales se pueden ver en la referencia [1].

Cabe acotar que en todos los casos que se analizarán, las fórmulas dadas para los concentradores se refieren a aquellos denominados “perfectos”, sin tomar en cuenta ningún tipo de error, aunque hay trabajos que los han considerado, entre ellos se puede ver los mencionados en las referencias [46] y [47].

8.2 FACTOR DE CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICO, PUNTUAL Y MEDIO

El sentido dado al término “concentración” debe ser claramente definido [48] según el contexto donde se aplica.

Se puede distinguir tres factores de concentración [49]:

1. Factor de concentración geométrico (C_g), definido en Sección 8.1.

$$C_g = \frac{A_c}{A_r}$$

2. Factor de concentración puntual $C(x)$, que es la razón de la intensidad $I_r(x)$ (flujo de energía por unidad de área y de tiempo), incidente sobre un punto del receptor definido por (x) , y la intensidad (I_0) de la radiación solar directa.

$$C(x) = \frac{I_r(x)}{I_0} \quad (8-2)$$

3. Factor de concentración promedio. En la práctica, el parámetro óptico de interés es el promedio de los valores del factor de concentración puntual $C(x)$ determinado sobre el área del receptor. Para un concentrador con foco lineal basta considerar el ancho (W_r) del receptor. Por lo tanto, el “factor de concentración medio” se define como:

$$\bar{C}(W_r) = \frac{1}{W_r} \int_{-W_r/2}^{W_r/2} C(x) \cdot dx = \frac{1}{I_0 W_r} \int_{-W_r/2}^{W_r/2} I_r(x) \cdot dx = \frac{\bar{I}_r}{I_0} \quad (8-3)$$

donde:

[46] Intensity distribution in cylindrical-circular receivers for non-perfect cylindrical-parabolic concentrators. Nicolás R.O. <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-24-16-2600>

[47] Development and applications of a two dimensional optical analysis of non-perfect cylindrical concentrators. Durán J.C., Nicolás R.O. . Solar Energy: 34 Nº3, 257-269 (1985)

[48] J.A.Moragues. “Collector for intermitate temperatura applications. Non-conventional energy sources”, ACIF Serie -Volumen 3, pag.263. 1982

[49] R.O.Nicolás y J.C. Durán. “Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators”. Solar Energy 25, 21 (1980).

I_r = intensidad media (o irradiancia, o densidad de flujo de energía) incidente sobre el receptor, o sea, energía que atraviesa la unidad de superficie del mismo en la unidad de tiempo.

La relación vale también para concentradores de dos dimensiones.

Para todo tipo de concentrador generalmente se utiliza el “factor de concentración geométrico” (C_g) que está relacionado con el factor de concentración medio $\bar{C}(W_r)$. Al considerar un concentrador de una dimensión, esta relación se dará mediante ^[49].

$$\bar{C}(W_r) = C_g \cdot (1 - P_t(W_r)) \cdot (1 - P) \cdot \cos \alpha = C_g \cdot \eta_0 \cdot \cos \alpha \quad (8-4)$$

donde:

$P_t(W_r)$ = representa las “pérdidas geométricas totales”, por ejemplo, aquella fracción de energía incidente en el área de abertura del concentrador que no llega al receptor

$$P_t(W_r) = 1 - (1 - P_c) \cdot (1 - P_g(W_r)) \quad (8-5)$$

siendo:

P_c = coeficiente de “pérdidas del concentrador”, que representa la fracción de energía incidente en el área de abertura que no es reflejada hacia el plano receptor, incluyendo absorción y dispersión en el espejo y sombras por efecto pantalla en concentradores facetados

$P_g(W_r)$ = coeficiente de “pérdidas geométricas”, que representa la fracción de energía incidente en el plano receptor que no llega al receptor propiamente dicho

$$P_g(W_r) = 1 - \frac{\int_{-W_r/2}^{W_r/2} I_r(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{\infty} I_r(x) \cdot dx} \quad (8-6)$$

P = tiene en cuenta posible pérdidas adicionales, como, por ejemplo, reflexión en la cobertura del receptor

α = es el ángulo que forman los rayos incidentes con la perpendicular al plano de abertura (ver Figura 8.3)

η_0 = eficiencia óptica

Por lo tanto, se define como la eficiencia óptica la siguiente ecuación:

$$\eta_0 = (1 - P_c) \cdot (1 - P_g(W_r)) \cdot (1 - P) \quad (8-7)$$

El ángulo (α) tiene una gran importancia en este tipo de concentradores, por cuanto de él depende el valor de (I_b) que es la energía incidente por unidad de superficie sobre el receptor, dada por:

$$I_b = I_0 \cdot \cos \alpha$$

siendo (I_0) la intensidad de la radiación solar cuando la dirección de ésta y la perpendicular al plano de abertura coinciden (ver Figura 8-3).

De las definiciones dadas vemos que $\bar{C}(W_r)$ es el factor de concentración que tiene significado físico, ya que está directamente relacionado con el flujo de energía incidente en el receptor; en cambio (C_g) no tiene relevancia por sí sólo y no está acotado.

Cuando ($\eta_0 = 1$), y ($\alpha = 0$), tenemos que:

$$C_g = \bar{C}(W_r)$$

por lo que, en dichas condiciones, el valor límite de $\bar{C}(W_r)$ coincide con el de (C_g), que es una cota máxima del factor de concentrador promedio.

Las definiciones anteriores son válidas también para concentradores con foco puntual.

8.2.1 Valores límites teóricos

Es interesante analizar los valores límites teóricos que se pueden lograr del factor de concentración para sistemas de dos dimensiones (foco lineal) y de tres dimensiones (foco puntual). Cuando están en su punto máximo, estos juegan para la concentración de radiación solar el mismo rol que la eficiencia de Carnot para los ciclos termodinámicos.

Se puede hacer un cálculo de la mayor concentración teórica posible considerando que llega al límite de la atmosfera una radiación solar que es la que denominamos constante solar, de 1.367 W/m^2 (ver Ecuación 3-2).

Haciendo un balance de energía para un receptor tridimensional ideal, sin pérdidas por conducción o convección y, despreciando la temperatura del ambiente hacia el cual el receptor entrega energía por radiación, se tiene:

$$\epsilon \cdot \sigma \cdot T_{\max}^4 = \alpha \cdot C \cdot G \quad (8-8)$$

donde:

- ϵ = emisividad del receptor
- σ = constante de Stefan Boltzmann - $5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
- T_{\max} = temperatura adiabática media en el receptor en K
- A = la absorptividad del receptor
- C = factor de concentración
- G = radiación solar que llega al concentrador (W/m^2)

Considerando que el receptor ideal alcanza el equilibrio térmico, o sea, cuando su temperatura es igual a la equivalente del Sol ($\approx 5.800 \text{ K}$), y la absorptividad y la emisividad son iguales, se tiene:

$$C = \frac{T_{\max}^4 \cdot \sigma}{G} \quad (8-9)$$

Suponiendo que la radiación solar que llega al concentrador es igual que la constante solar, se tiene:

$$C \approx 47.000 \quad (8-10)$$

Que es un máximo de concentración teórica que se puede alcanzar con un concentrador de dos dimensiones.

Winston ^[50] mostró que toda radiación incidente sobre una superficie plana de área (A_c), con un ángulo de incidencia (θ_c) medido con respecto a su perpendicular, más pequeño que (θ_s), que es el semiángulo de abertura del disco solar ($\theta_c \leq \theta_s$), puede ser concentrada en un área receptora (A_r), satisfaciendo las siguientes relaciones:

$$A_r \geq A_c \text{ sen } \theta_s \quad \text{para dos dimensiones}$$

$$A_r \geq A_c \text{ sen}^2 \theta_s \quad \text{para tres dimensiones}$$

R. Nicolás y J.C. Durán ^[51], basados en las relaciones anteriores, calcularon los factores teóricos de concentración máximos, utilizando disco solar con distribución de intensidad uniforme en tres dimensiones.

Para concentradores en dos dimensiones

$$C_{m2} = \frac{4}{\pi \cdot \text{sen } \theta_s} \cong 274 \quad (8-11)$$

Para concentradores en tres dimensiones

$$C_{m3} = \frac{1}{\text{sen}^2 \theta_s} \cong 46.165 \quad (8-12)$$

Considerando disco solar con distribución de intensidad uniforme en dos dimensiones, determinaron:

$$C_{m2} = \frac{1}{\text{sen } \theta_s} \cong 215 \quad ; \quad C_{m3} \cong 36.260 \quad (8-13)$$

para sistemas de dos y tres dimensiones, respectivamente.

Igualmente consideraron la distribución de la disco solar dada por P.D.Jose ^[52] con lo que obtuvieron:

$$C_{m2} \cong 299 \quad ; \quad C_{m3} \cong 57.940 \quad (8-14)$$

Finalmente, considerando que la eficiencia óptica del concentrador es uno y que el ángulo entre los rayos que vienen del centro del Sol y la perpendicular a la apertura del receptor es cero, determinaron el valor del factor de concentración medio \bar{C} (A_r) directamente de las relaciones de Winston antes dadas:

[50] R.Winston. "Light collection within the framework of geometric optics". J. Op. Soc. Am. 60, 245 (1970).

[51] R. Nicolás and J. C. Durán. "Theoretical maximum concentration factors for solar concentrators". Optical Society of America A. Vol 1, 1110. (1984)

[52] P.D.Jose- "The flux through the focal spot of a solar furnace". Solar Energy 1, 19 (1957)

$$\bar{C}(A_r) = \frac{1}{\sin \theta_s} \cong 215 \quad ; \quad \bar{C}(A_r) = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \cong 46.165 \quad (8-15)$$

Estos valores son independientes del modelo utilizado para la distribución de intensidad en el disco solar.

A. Rabl ^[53] propuso un desarrollo basado en el balance energético del colector ideal. Empleando la segunda ley de la termodinámica, aplicada al intercambio radiativo entre un receptor y el Sol, demostró que existe un límite geométrico del factor de concentración, considerando la distancia Tierra-Sol (R), el radio del Sol (r) y el semiángulo (θ_c) de abertura del disco solar.

A continuación, se demostrará la deducción para el caso de un concentrador de foco puntual, o sea, el caso tridimensional siguiendo la referencia ^[53].

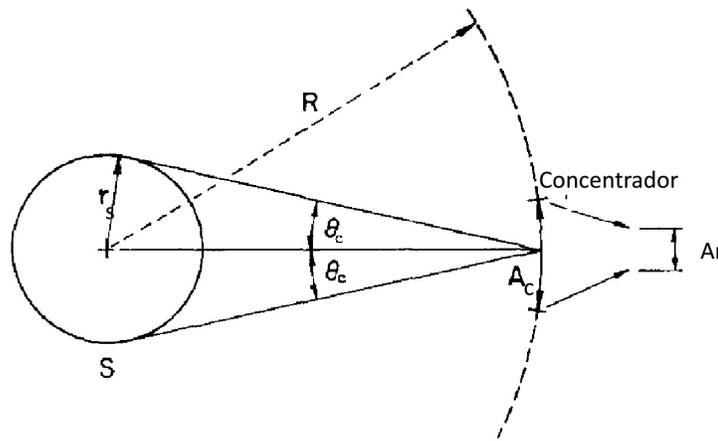


Figura 8-5: Transferencia de radiación del Sol, a través de un concentrador de apertura (A_c) a un receptor de área (A_r).

En la Figura 8-5 se considera el Sol como un cuerpo negro a temperatura (T_s), y como una esfera radiante con radio (r_s) emitiendo una cantidad de radiación en forma isotrópica, determinada por la Ecuación

$$Q_s = 4 \cdot \pi \cdot r_s^2 \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

donde (σ) es la constante de Stefan-Boltzmann.

De la radiación emitida por el Sol, que se va a considerar como la fuente emisora, llega al área del concentrador (A_c) una fracción ($F_{f \rightarrow A_c}$) igual a la relación de esta y el área de la esfera de radio R (distancia Tierra-Sol), conforme la misma Figura 8-5.

$$F_{f \rightarrow A_c} = \frac{A_c}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

[53] A.Rabl. "Comparison of solar concentrators". Solar Energy 18, 98, (1976)

Para un concentrador ópticamente perfecto, considerando todo el sistema en el vacío, toda la radiación que llega al mismo será reflejada al receptor, la cual será

$$Q_{S \rightarrow rec} = Q_s \cdot F = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_s^2 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \cdot A_c}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = A_c \cdot \frac{r_s^2}{R^2} \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (8-16)$$

El receptor, que se considera también como un cuerpo negro en su comportamiento, va a irradiar como:

$$Q_{recep} = A_r \cdot \sigma \cdot T_r^4$$

La fracción ($F_{rec \rightarrow S}$) de esta radiación que llega al sol no puede exceder la unidad:

$$F_{rec \rightarrow S} \leq 1 \quad (8-17)$$

Luego la transferencia radiativa del receptor a la fuente ($Q_{rec \rightarrow S}$) es:

$$Q_{rec \rightarrow S} = F_{rec \rightarrow S} \cdot A_r \cdot \sigma \cdot T_r^4 \quad (8-18)$$

El receptor puede tener como temperatura máxima a la de la fuente; suponiendo que estas son iguales ($T_r = T_s$), por la segunda ley de la termodinámica no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos cuerpos de igual temperatura, y se debe cumplir:

$$Q_{S \rightarrow rec} - Q_{rec \rightarrow S} = 0 \quad (8-19)$$

Reemplazando en la Ecuación (8-19) los valores de las Ecuaciones (8-16) y (8-18) se tiene:

$$A_c \cdot \frac{r_s^2}{R^2} \cdot \sigma \cdot T_s^4 = F_{rec \rightarrow S} \cdot A_r \cdot \sigma \cdot T_r^4$$

$$A_c \cdot r_s^2 = F_{rec \rightarrow S} \cdot A_r \cdot R^2$$

De donde el factor de concentración geométrico definido en Ecuación (8-1) pasa a ser:

$$C_g = A_c / A_r = (R^2 / r_s^2) \cdot F_{rec \rightarrow S}$$

De Figura 8-5 se cumple que

$$r_s = R \cdot \sin \theta_c$$

luego

$$C_g = A_c / A_r = F_{rec \rightarrow S} / \sin^2 \theta_c$$

de donde, de acuerdo a Ecuación (8-17):

$$C_g \leq 1 / \sin^2 \theta_c \quad (8-20)$$

Es apropiado definir un concentrador ideal como el que tiene la máxima concentración permitida por la segunda ley de la termodinámica y usarlo como un estándar de comparación con los sistemas reales.

Luego el factor de concentración de cualquier conjunto óptico de tres dimensiones será:

$$C_{g-3 \text{ dimen}} \leq C_{g \text{ ideal } 3 \text{ dimen}} = n / \sin^2 \theta_c \quad (8-21)$$

Donde (n) es el índice de reflexión del medio donde está el concentrador.

Haciendo un análisis similar para el caso de concentrador de dos dimensiones, con foco lineal, se obtiene que

$$C_{g-2 \text{ dimen}} \leq C_{g \text{ ideal } 2 \text{ dimen}} = n / \text{sen } \theta_c \quad (8-22)$$

Considerando ($n=1$) y el ángulo ($\theta_c = 16$ minutos) ^[54], para concentradores de dos dimensiones se tiene:

$$C_{\max} = 1 / \text{sen } (\theta_c) = 215 \quad (8-23)$$

Y para concentradores de tres dimensiones:

$$C_{\max} = 1 / \text{sen}^2 (\theta_c) = 46.165 \quad (8-24)$$

Los valores dados en las Ecuaciones (8-23) y (8-24), similares a los calculados por otras aproximaciones, son usualmente considerados como los límites superiores de los factores de concentración máximos.

8.3 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SISTEMA. TEMPERATURA MÁXIMA

Cuando incide radiación solar de intensidad media \bar{I}_r (W/m^2) sobre una superficie receptora con una absorbancia ($\alpha_{\text{abs},S}$) a una temperatura (T_r), una fracción de la misma se convierte en energía térmica, transmitiéndose una parte al fluido de trabajo que se encuentra en contacto con la superficie, y el resto al medio que rodea a aquella a través de procesos de radiación, conducción y convección. La potencia por unidad de área (P), que se transmite al fluido, se puede expresar como:

$$P = \alpha_{\text{abs},S} \cdot \bar{I}_r - \varepsilon_{\text{abs},Ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) - (h + k) \cdot (T_r - T_a)$$

donde:

$\alpha_{\text{abs},S}$ = absorbancia del receptor para radiación solar,

$\varepsilon_{\text{abs},Ir}$ = emitancia del absorbedor en la región infrarrojo correspondiente a la (T_r)

T_a = temperatura ambiente (K)

T_r = temperatura del receptor (K)

σ = constante de Stefan Boltzman

h = coeficiente de pérdida térmica por convección (w/m^2K)

k = coeficiente de pérdida térmica por conducción (w/m^2K)

Para facilitar el análisis, se considera que las temperaturas de la superficie receptora y del ambiente que la rodea es homogénea.

La eficiencia térmica (η_{te}) está dada por:

[54] 1' (minuto) = 1/60 ° (grado); 1° (grado) = $\pi/180$ radianes. 16' = (16/60) ($\pi/180$) = 0,0046557 radianes.

$$\eta_{te} = \frac{P}{\bar{I}_r} = \alpha_{abs,S} - \frac{\varepsilon_{abs,Ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) + (h+k) \cdot (T_r - T_a)}{\bar{I}_r} \quad (8-25)$$

En general, en los sistemas estudiados en este libro, se acepta que las pérdidas térmicas se verifican esencialmente por radiación, dado que las que ocurren por convección y conducción pueden ser reducidas a valores despreciables, colocando el receptor en un equipo al vacío; luego, para el análisis, se considera únicamente la parte radiativa de la Ecuación (8-25).

$$\eta_{te} = \alpha_{abs,S} - \frac{\varepsilon_{abs,Ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4)}{\bar{I}_r} \quad (8-26)$$

Reemplazando \bar{I}_r de Ecuación (8-3) e introduciendo el factor de selectividad (F_s) definido en Ecuación (4-3), se obtiene

$$\eta_{te} = \alpha_{abs,S} \cdot \left(1 - \frac{\sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4)}{\bar{C}(Wr) \cdot I_b \cdot F_s}\right) \quad (8-27)$$

La temperatura máxima que se puede lograr con el sistema en estudio, corresponde al estado de equilibrio en el cual la radiación absorbida es igual a la emitida, lo que equivale a ($\eta_{te} = 0$); luego de la Ecuación (8-27) se obtiene:

$$T_{r \max} = \sqrt[4]{\frac{F_s \cdot \bar{C}(Wr) \cdot I_b}{\sigma}} + T_a \quad (8-28)$$

De las Ecuaciones (8-27) y (8-28) se deduce que, para aumentar la eficiencia del sistema o la temperatura posible de la superficie receptora, podemos incrementar el factor de selectividad o el de concentración, o ambos a la vez.

En la Figura 8-6 se representa (η_{te}/α) en función del producto ($F_s \cdot \bar{C}(wr) \cdot I_b$) para diferentes temperaturas del receptor ^[55]. Se puede observar que, para llegar a 500 °C con una eficiencia del 60 %, considerando $\alpha = 0,85$, el producto de la abscisa debe ser de ~67 kW/m².

Como valor indicativo, la radiación solar directa puede ser igual a 800 kW/m², con lo cual el producto ($F_s \cdot \bar{C}(wr)$) debe ser ~84.

[55] R.O.Nicolás y J.C.Durán. Comunicación privada 1982.

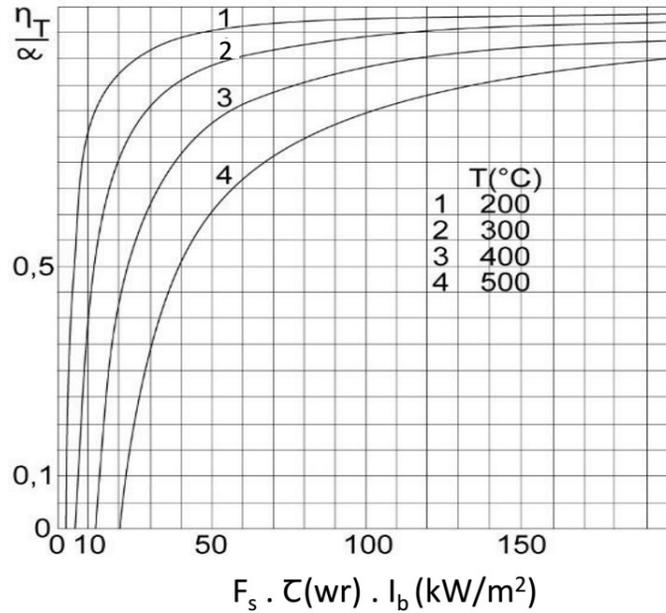


Figura 8-6: Eficiencia térmica (η_t) dividida la absorbancia (α) en función del producto del factor de selectividad (F_s) por el factor de concentración $C(w_r)$ y por la radiación solar directa (I_b) para diferentes temperaturas del receptor. Referencia [55].

8.4 EFICIENCIA TOTAL INSTANTÁNEA

La eficiencia total instantánea de un concentrador es el producto de la térmica (η_{te}) por la óptica (η_o):

$$\eta = \eta_{te} \cdot \eta_o = \left(\alpha_{abs,S} - \frac{\epsilon_{abs,ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) + (h+k) \cdot (T_r - T_a)}{\bar{I}_r} \right) \cdot \eta_o \quad (8-29)$$

donde:

(\bar{I}_r) es la intensidad media incidente sobre el receptor, o sea, es la energía que atraviesa la unidad de superficie del receptor en la unidad de tiempo.

Reemplazando (\bar{I}_r) de Ecuación (8-3) y $\bar{C}(W_r)$ de Ecuación (8-4) en la ecuación anterior se tiene:

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\alpha_{abs,S} - \frac{\epsilon_{abs,ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) + (h+k) \cdot (T_r - T_a)}{I_b \cdot \bar{C}(W_r)} \right) \cdot \eta_o \\ &= \alpha_{abs,S} \cdot \eta_o - \frac{\epsilon_{abs,ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) + (h+k) \cdot (T_r - T_a)}{I_b \cdot C_g \cdot \cos \alpha} \end{aligned} \quad (8-30)$$

El resultado es el cociente entre la energía útil extraída del receptor y la energía solar que pasa a través de la abertura del concentrador.

Es importante tener en cuenta el hecho que tanto la eficiencia térmica (η_{te}) cuanto la eficiencia óptica (η_o) (Ecuación 8-29) dependen del ancho del receptor para concentradores de foco lineal, pero en forma opuesta:

$$\eta_o = (1-P_c) \cdot (1-P_g(W_r)) \cdot (1-P)$$

$$\eta_{te} = \alpha_{abs,S} - \frac{\epsilon_{abs,ir} \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_a^4) + (h + k) \cdot (T_r - T_a)}{I_b \cdot \bar{C}(W_r)}$$

Esto se puede ver en la Figura 8-7, donde las pérdidas geométricas en el receptor $P_g(W_r)$ y el factor de concentración medio $\bar{C}(W_r)$ son representados en función del ancho del receptor (W_r), para un concentrador cilíndrico parabólico; el ángulo (k) se definió en Sección 8.1.

A fin de obtener la eficiencia total máxima (η) es necesario seleccionar cuidadosamente el ancho del receptor.

Es posible expresar (η) de un modo similar a la eficiencia del colector plano.

$$\eta = \eta_o' - (U \cdot (t_r - t_a) / C_g \cdot I_b \cdot \cos \alpha)$$

donde (U) es una expresión compleja que representa las pérdidas totales de calor del receptor, es decir, las correspondientes por conducción, convección y radiación. En el caso de un campo de concentradores, es necesario abstraer un término que tiene en cuenta las pérdidas de calor de la tubería. Se suele incluir en (U) el factor de concentración geométrico con lo cual queda la expresión:

$$\eta = \eta_o' - (U' \cdot (t_r - t_a) / I_b \cdot \cos \alpha)$$

Es conveniente expresar la eficiencia en función de la temperatura media del fluido de trabajo $t_m = (t_e + t_s)/2$

$$\eta = F \cdot (\eta_o' - (U' \cdot (t_m - t_a) / I_b \cdot \cos \alpha)) \quad (8-31)$$

donde:

F = factor de eficiencia del receptor, coeficiente de corrección que simplifica la medición de la temperatura, tomando en cuenta la del fluido y no la del receptor.

En la Figura 8-8 se muestra el gráfico de la Ecuación (8-31) para un concentrador cilíndrico parabólico, cuyos parámetros fueron medidos al mediodía solar, donde se muestra ($F \cdot \eta_o'$) como la ordenada en el origen, así como la pendiente ($F \cdot U$).

Experimentalmente, la eficiencia total de un concentrador se determina a través de la medición de los parámetros que permiten obtener la energía útil extraída del receptor, y la energía solar que incide sobre el sistema.

$$\eta = \frac{m \cdot C_p \cdot (t_s - t_e)}{I_0 \cdot A_c \cdot \cos \alpha} \quad (8-32)$$

donde:

m = flujo de masa por unidad de tiempo a través del receptor (kg/s)

C_p = calor específico del fluido a la salida del receptor (J/(kg°C))

t_s = temperatura del fluido a la salida del receptor (°C)

t_e = temperatura del fluido a la entrada del receptor (°C)

A_c = área de abertura del concentrador (m²)

α = ángulo de incidencia de la radiación

I_0 = radiación solar directa (W/m²)

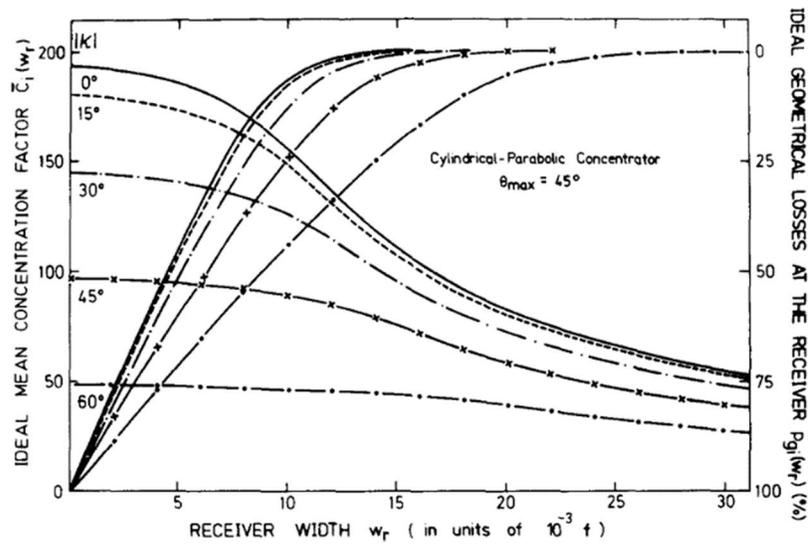


Figura 8-7: Factor de concentración medio ideal y pérdidas geométricas en el receptor, en función de su ancho, para un concentrador cilíndrico parabólico con receptor plano. La longitud focal es indicada con (f) y (k) es el ángulo definido en la Figura 8-2. Referencia [56].

[56] R.O.Nicolás y J.C.Durán. Generalización of two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators. Solar Energy. 25, 21 (1980)

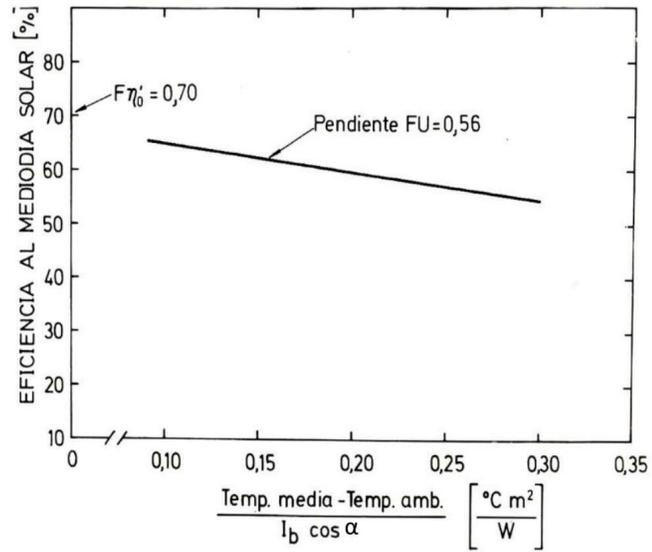


Figura 8-8: Curva de eficiencia total de un concentrador cilíndrico-parabólico tomada al mediodía solar para diferentes temperaturas de operación. Referencia [57].

[57] V.E.Dudley, R.M.Workhoven. Concentration Solar Collection Test, Results. SAND 78-0977. 1979.

9 DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CONCENTRADORES

En la Figura 9-1 se muestra esquemáticamente los concentradores que más se han estudiado, por tipo de movimiento. Dentro de cada uno, está presentado el factor de concentración geométrico en orden creciente, lo que equivale a su calidad óptica ascendente, indicándose el intervalo de rango del mismo, que es lo que se logra en la práctica. En las secciones siguientes se describe en detalle cada uno de los sistemas.

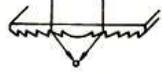
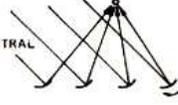
MOVIMIENTO	CONCENTRADOR	CONVERSION
AJUSTE ESTACIONAL	PARABOLICO COMPUESTO (CPC) $C_g = 1,5 - 10$ 	
MOVIMIENTO ALREDEDOR DE DOS EJES (FOCO LINEAL)	LENTE DE FRESNEL $C_g = 10 - 40$ 	DISTRIBUIDA
MOVIMIENTO ALREDEDOR DE UN EJE (FOCO LINEAL)	FIJO A ESPEJO FACETADO $C_g = 20 - 60$ 	
	MULTIPLES ESPEJOS CONCAVOS GIRATORIOS SISTEMA RECEPTOR CENTRAL CON FOCO LINEAL $C_g = 20 - 80$ 	
	CILINDRICO PARABOLICO * $C_g = 20 - 100$ 	DISTRIBUIDA
MOVIMIENTO ALREDEDOR DE DOS EJES (FOCO PUNTUAL)	FIJO SEMIESFERICO $C_g = 100 - 300$ 	DISTRIBUIDA
	LENTE DE FRESNEL $C_g = 100 - 1000$ 	
	TORRE CENTRAL $C_g = 100 - 1.000$ 	CENTRALIZADA
	PARABOLOIDE DE REVOLUCION $C_g = 100 - 5.000$ 	DISTRIBUIDA

Figura 9-1: Tipos genéricos de concentradores.

Los sistemas de conversión distribuida transforman la energía solar en térmica directamente en cada concentrador, siendo necesario transportarla hasta su punto de almacenaje, común a todos los equipos y cercano al lugar de utilización; para ello se requiere una modalidad de transporte con un alto grado de aislación térmica.

Los sistemas de conversión centralizada, en cambio, colectan la radiación solar y la transmiten por medios ópticos, reflejándola hasta un punto donde se convierte en térmica. Este proceso en general se verifica, igualmente, próximo al lugar donde esta energía es utilizada.

Como anteriormente mencionado, todos los concentradores usan solamente la radiación directa, salvo el tipo CPC que utiliza, además, una parte de la radiación difusa.

Con el incremento del factor de concentración, es posible extraer energía útil de los receptores a temperaturas más altas, sin disminuir la eficiencia. La Figura 9-2 muestra el efecto del mismo en función de la temperatura del receptor, para varios de los concentradores considerados. El beneficio de la temperatura alcanzable lleva al aumento en la exactitud requerida para seguir el desplazamiento aparente del Sol y, por ende, del grado de complejidad necesaria para el movimiento del sistema.

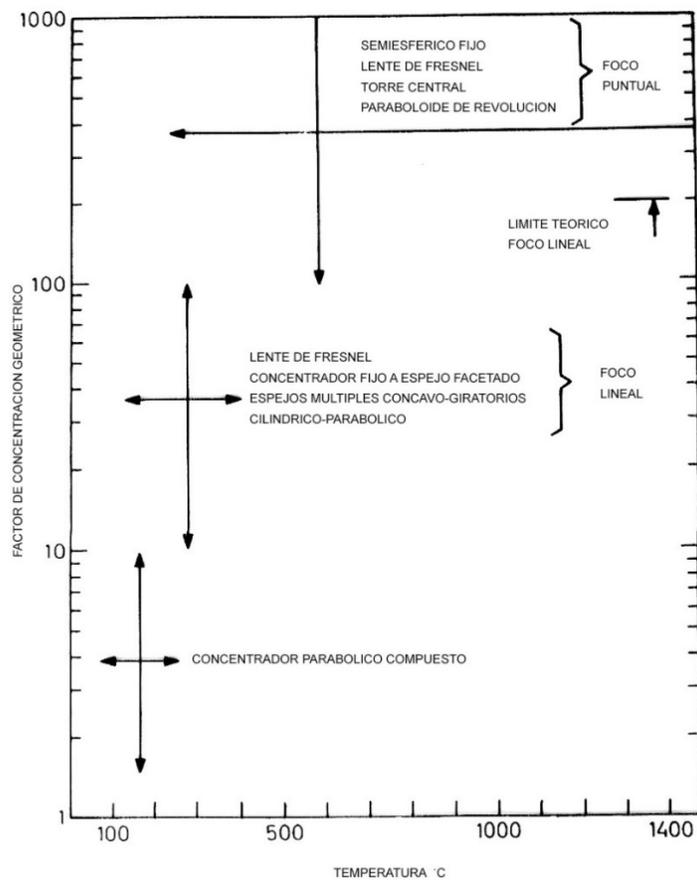


Figura 9-2: Factor de concentración geométrica en función de la temperatura para diferentes tipos de concentradores.

Al igual que en el caso de los colectores planos, en los concentradores de radiación solar, a medida que aumenta la temperatura final del fluido de trabajo disminuye la eficiencia de la conversión. Como ejemplo, en la Figura 9-3 se muestra la relación entre la temperatura alcanzable y la eficiencia de conversión de energía solar en térmica, para:

- Colectores planos con superficie selectiva y efecto invernadero; el límite de temperatura alcanzable es de ~ 180 °C, pero con eficiencia muy baja.
- Concentradores con foco lineal, como los cilíndricos parabólicos, cuyo factor de concentración teórico máximo es del orden de 215. Con estos sistemas se puede lograr temperaturas entre 300 a 400 °C con una eficiencia alrededor del 65 %.
- Concentradores con foco puntual, como los parabólicos de revolución, cuyo factor de concentración teórico máximo es de 46.000, pudiéndose lograr temperaturas elevadas (900-1.000 °C) con buena eficiencia (65-70 %).

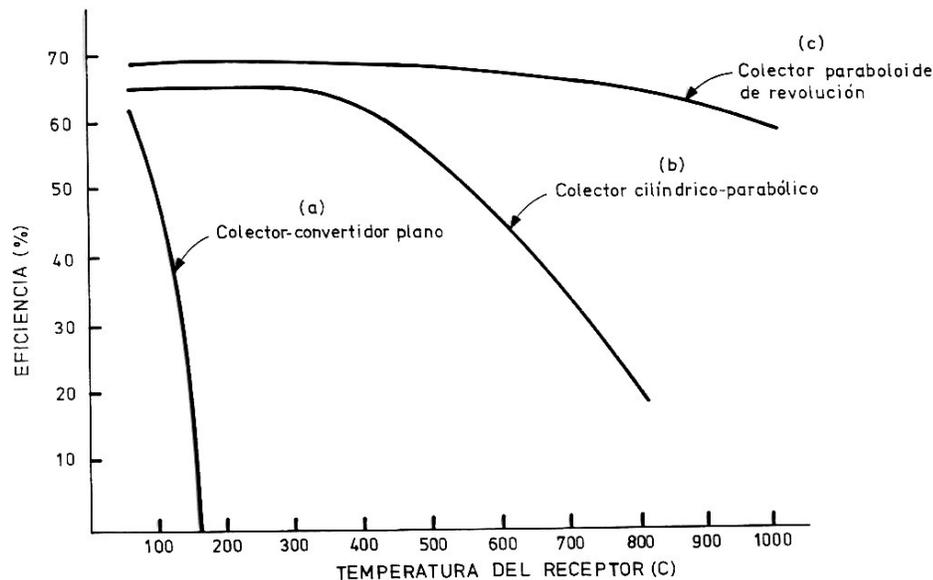


Figura 9-3: Relación entre la eficiencia y las temperaturas alcanzadas con colectores planos, concentradores cilíndrico-parabólicos y paraboloides de revolución. Los receptores correspondientes a las curvas (a) y (b) están cubiertos con superficies selectivas cuya relación entre coeficiente de absorción y de emisión vale 10.

Del conjunto de concentradores que se analizarán con cierto detalle en las secciones siguientes, los que han avanzado más y representan la mayor parte de la capacidad instalada actualmente son Cilíndricos parabólicos, Torre central y Fresnel lineal.

9.1 CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO

El Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), o concentrador de Winston, está constituido por dos porciones de parábolas simétricas, en las que los ejes están

inclinados en un ángulo $(\delta/2)$ respecto al eje de simetría del equipo, de forma que el foco de una de ellas se encuentra en el extremo de la otra, siendo (δ) el ángulo de aceptación, aquel para el cual el sistema recibe rayos solares y los concentra sin necesidad de movimiento. (ver Figuras 9-4 y 9-5).

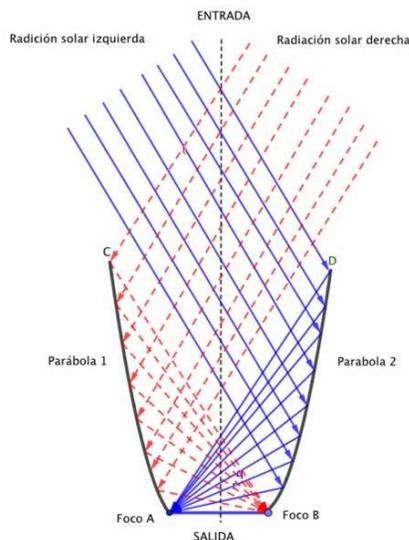


Figura 9-4: Corte de un CPC donde se muestra la marcha de los rayos de las dos porciones de parábolas y sus parámetros principales. Referencia [58].

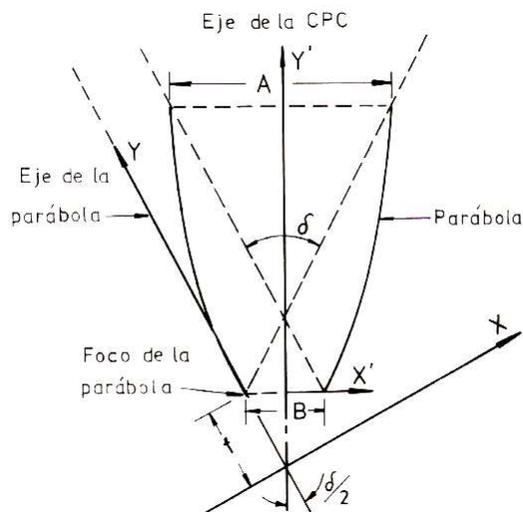


Figura 9-5: Perfil de un concentrador parabólico compuesto, donde (A) es la abertura del concentrador, (B) el ancho del receptor y (δ) el ángulo de aceptación.

[58] <https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/?Imagen-o-no-imagen-esa-es-la-cuestion-con-los-CPC-s>

Considerando el concentrador en dos dimensiones, se demuestra ^[59] que en un sistema constituido de una abertura de entrada (A), de un ancho de receptor (B), si el ángulo de abertura de un haz luminoso incidente es ($\delta/2$) (ver Figura 9-5), el factor de concentración máximo es:

$$C = B / A = 1 / \text{sen} (\delta/2) \quad (9-1)$$

También se observa que

$$\cos \frac{\delta}{2} = \frac{(A^2 - B^2)^{1/2}}{A} \quad (9-2)$$

El CPC puede concentrar radiación directa y una fracción de radiación difusa (D) dada por la referencia ^[60] :

$$\begin{aligned} \text{Fracción de radiación difusa} &= D / C && \text{si } (\beta + \delta/2) < 90^\circ \\ &D / 2 (1 / C - \cos \beta) && \text{si } (\beta + \delta/2) > 90^\circ \end{aligned}$$

donde (β) es el ángulo entre el eje del CPC y la vertical del lugar.

La concentración geométrica va hasta un máximo de 10.

Toda la radiación que llega al área de abertura, con un ángulo de incidencia (α) igual o menor que el semiángulo de aceptación, alcanza al receptor.

La altura (L) del colector está dada por:

$$L = (A+B) / \text{tg} \delta/2 \quad (9-3)$$

El valor de (L) es importante, pues una disminución en 1/3 de este dato, apenas modifica el ángulo de abertura, pero influye sensiblemente en el precio de las superficies reflectantes y, por lo tanto, del colector.

La Figura 9-6 muestra el factor de concentración (C) como una función del cociente (L/A) para diferentes valores de ($\delta/2$). Se observa que es posible construir un CPC truncado con tamaños de reflectores de mayor practicidad, sin perder demasiado factor de concentración.

Cuanto mayor es el factor de concentración, o sea, el ángulo de aceptación menor, se reduce la radiación difusa usada y, además, se hace necesario modificar la inclinación del plano de abertura más frecuentemente. Por otro lado, el área del reflector por unidad de abertura requerida también aumenta al incrementar C, lo cual es importante desde el punto de vista práctico y económico.

[59] Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. S. Tapia S. y J.A. del Río P. Revista Mexicana de Física 55 (2) 141–153-2009.

[60] http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol6num19/Revista_de_Energ%C3%ADa_Qu%C3%ADmica_y_F%C3%ADsica_V6_N19_3.pdf

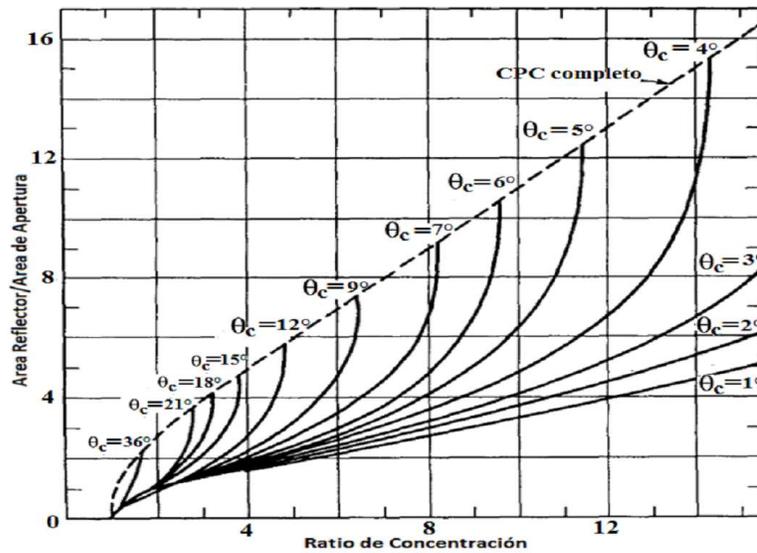


Figura 9-6: Factor de concentración del CPC en función del cociente entre la altura de los reflectores y la abertura, para diferentes valores de $(\delta/2)$. Referencias [61][62].

En la Figura 9-7 se muestra un CPC completo con el receptor y sistema de extracción de fluido.

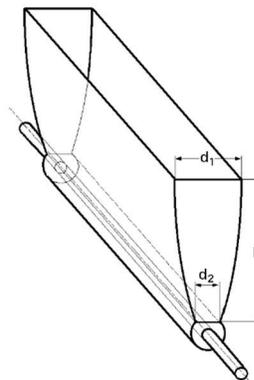


Figura 9-7: Vista de un CPC Completo.

Como vimos en la Sección 5.2.3, el sistema de CPC se puede utilizar asociado a un captador plano para reforzar la concentración, conforme Figura 9-8, y actuar como dispositivo antirradiante.

[61] Solar Engineering of Thermal Processes. Third Edition. John A. Duffie and William A. Beckman. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2006.

[62] https://pirhua.udel.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME_159.pdf

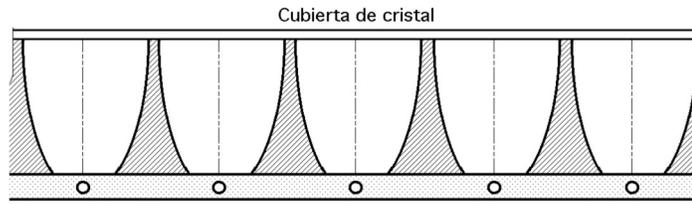


Figura 9-8: Concentrador parabólico compuesto asociado a un captador plano.

También se puede asociar dos colectores ideales con índices de refracción diferentes ^[63], conforme Figura 9-9, con lo que se aumenta la concentración en la relación (n_2/n_1) , permitiendo ángulos de apertura del orden de 35; para un acoplamiento cristal-aire la relación es $(n_2/n_1 = 1,5)$.

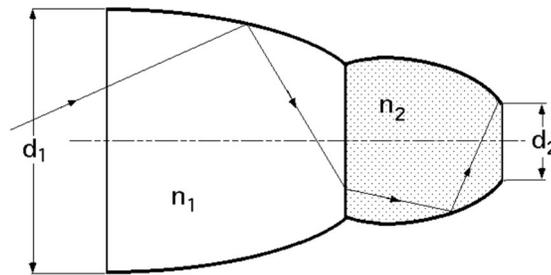


Figura 9-9: Asociación de dos concentradores parabólicos compuestos, con índices de refracción diferentes. Referencia [63].

9.2 LENTES DE FRESNEL

Una lente de Fresnel es derivada de un plano convexo, donde, como se observa en la Figura 9-10, al proyectarse todas sus partes, esta se reduce prácticamente a una lente plana.

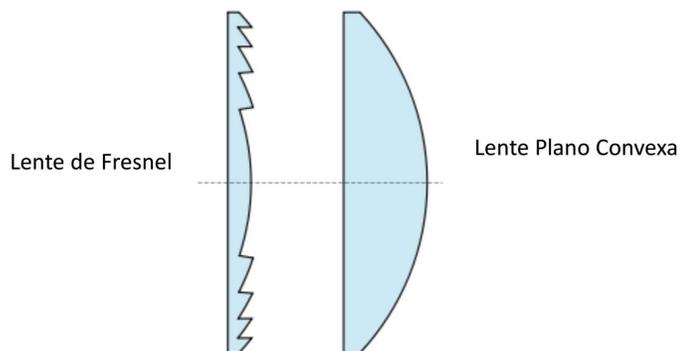


Figura 9-10: Formación de una lente de Fresnel.

[63] <https://issuu.com/merlucin/docs/04solar>

Cada unidad concentradora está constituida por una lente de Fresnel con foco lineal o puntual, con sus facetas ubicadas hacia el receptor, según se muestra en la Figura 9-11.

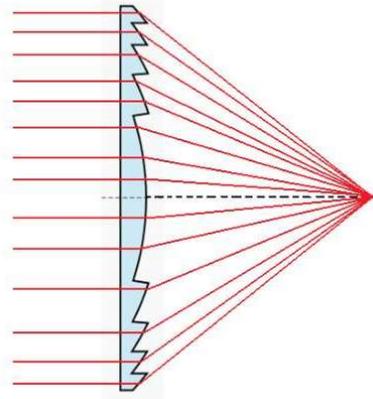


Figura 9-11: Diagrama de una lente de Fresnel.

Las lentes, del orden de 7-10 mm de espesor, suelen ser de acrílico, a fin de mantener su costo lo más bajo posible. La transmisión de la radiación disminuye solo en un 11 % después de estar expuesta a la intemperie por un período de 17 años.

Para lograr factores de concentración geométricos mayores de 10 con lentes de foco lineal, serán necesarios dos ejes de rotación.

9.3 CONCENTRADOR FIJO A ESPEJO FACETADO

El concentrador fijo a espejo facetado (CFEF)^[64] está constituido por un conjunto de espejos planos, angostos y largos, dispuestos de manera que sus ejes longitudinales de simetría estén sobre un cilindro imaginario de referencia. Uno de los elementos reflectores es tangente a dicho cilindro, y los demás forman ángulos prefijados respecto a este espejo (ver Figura 9-12).

En la Figura 9-13 se indica el ángulo (Φ) determinado por la proyección de los rayos incidentes sobre el plano perpendicular a los ejes longitudinales de los espejos (P_{\perp}), y el plano de abertura, donde:

θ_a = abertura angular del concentrador

ξ = ángulo entre dos planos que contienen al eje de simetría (O_c) del cilindro de referencia, conteniendo, además, uno a la vertical y el otro a la bisectriz del ángulo de abertura

[64] R.O.Nicolas, J.A.Moragues R.P.Platzeck, 3ra Reunión de Trabajo de la ASADES, Mendoza, 1977.
R.O.Nicolás, R.P.Platzeck, J.C.Durán, J.A.Moragues y W.Scheuer. Publicación interna CNEA NT 35/78.
6ta Reunión de Trabajo de la ASADES, Catamarca, 1978.

ρ = ángulo formado entre el plano de simetría del concentrador y el plano que contiene el eje (O_c) y el de simetría del espejo tangente

θ_{M1} = valor máximo de (θ_n), que corresponde al espejo (n_{M1})

θ_{M2} = módulo del valor mínimo de (θ_n) que corresponde al espejo (n_{M2})

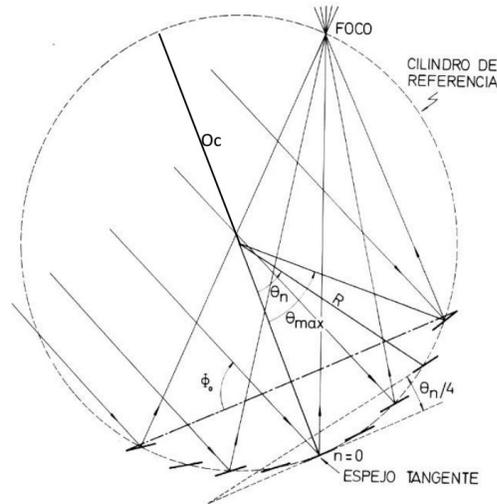


Figura 9-12: Concentrador fijo a espejo facetado. Referencia [64].

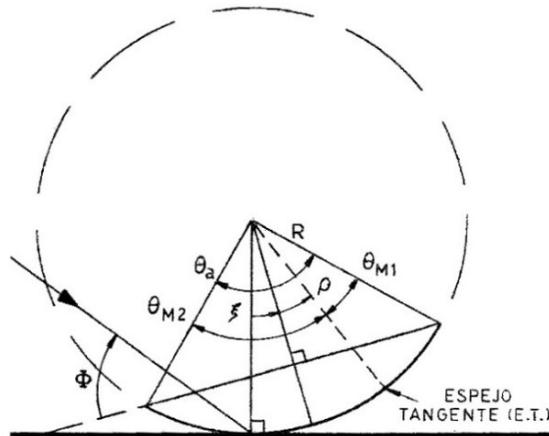


Figura 9-13: Definición de ángulos del concentrador fijo a espejo facetado. Referencia [64].

Según se observa en la Figura 9-12, si la posición angular del espejo (n) con respecto al tangente es (θ_n), y el ángulo entre los planos que contiene a ambos es ($\theta/4$), es posible demostrar que, para cualquier dirección de un haz paralelo de rayos incidentes, el sistema tiene una zona focal lineal localizada sobre el cilindro de referencia, y que las sucesivas posiciones de este último, debidas al movimiento aparente del Sol, están también ubicadas sobre dicho cilindro. Por lo tanto, el receptor de la energía concentrada puede estar

constituido por un tubo soportado por brazos, cuyo centro de giro se halla sobre el eje de simetría del cilindro de referencia (ver Figura 9-15).

La orientación más conveniente para los CFEF es de este-oeste. Para que las pérdidas en los extremos del receptor sean despreciables, la relación entre el largo del concentrador y su radio debe ser superior a 50.

El factor de concentración geométrica (C_g) depende de la relación existente entre el ancho (W) de los espejos y el radio (R) del cilindro directriz (W/R), y también del ángulo de incidencia de la radiación.

$$C_g = \frac{2 \cdot \text{sen}(\theta_a/2) \cdot \text{sen}(\Phi) \cdot (1-p_g)}{\frac{W}{R} + 4 \cdot \tan(\alpha_s/2)} \quad (9-4)$$

donde (ver Figura 9-13):

θ_a = apertura angular del concentrador

Φ = ángulo determinado por la proyección de los rayos incidentes sobre el plano P_\perp y el plano de abertura

p_g = pérdidas geométricas, o sea, disminución de la radiación incidente por los apantallamientos producidos entre espejos o por incidencia sobre zonas no reflectantes

$\alpha_s = 32' =$ apertura angular del Sol

A través de (Φ) y de (p_g), (C_g) dependerá de la época del año y de la hora del día.

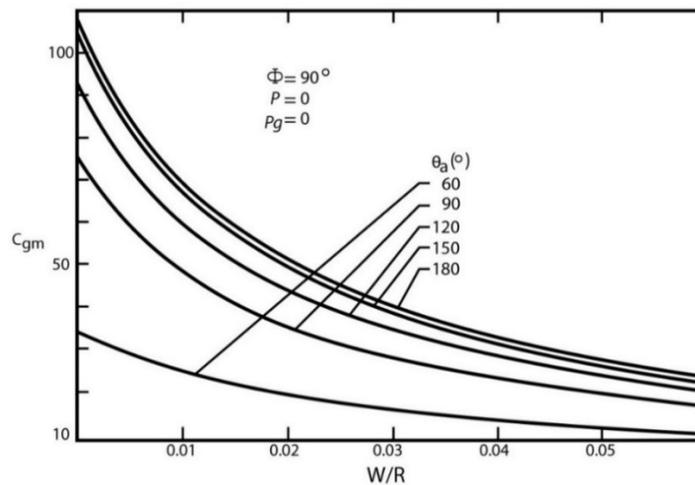


Figura 9-14: Factor de concentración máximo. Referencia [64].

En la Figura 9-14 se muestra como varía el valor máximo de (C_g), que se logra con ($\Phi=90^\circ$) y ($P_g = 0$), que corresponde a ($p=0$), en función de W/R , para concentradores con distintos (θ_a).

En el caso de elementos ópticos planos, para una relación de $W/R=0,02$ y un ángulo de apertura de 150° , el (C_g) varía de 35, para un ángulo de incidencia de $\pm 40^\circ$, a 65 para incidencia normal, considerando pérdidas en el receptor menores que el 5 %. El factor de concentración máximo teórico para $W/R \rightarrow 0$ es de ~ 100 . En casos prácticos, el (C_g) para el sistema con espejos curvos es aproximadamente 1,5 veces mayor que para el espejo plano. En el caso límite $W/R \rightarrow 0$, ambos factores coinciden.

Es posible incrementar los factores de concentración colocando en el receptor un segundo concentrador, por ejemplo, del tipo Winston. En este caso y con superficie selectiva en el receptor, es factible diseñar un CFEF con elementos ópticos planos que permita obtener temperaturas del orden de los 540°C .

La dimensión típica de los concentradores fijos a espejos facetados es: el diámetro del cilindro de referencia de ~ 4 m, el ancho de cada espejo plano de ~ 4 cm, el número de espejos de 70 y la longitud del módulo de ~ 50 m. Se denomina módulo al total de unidades de espejo que es posible manejar con un motor.

En la Figura 9-15 se muestra un prototipo de central de concentradores fijos a espejo facetado, instalada en Córcega, Francia.

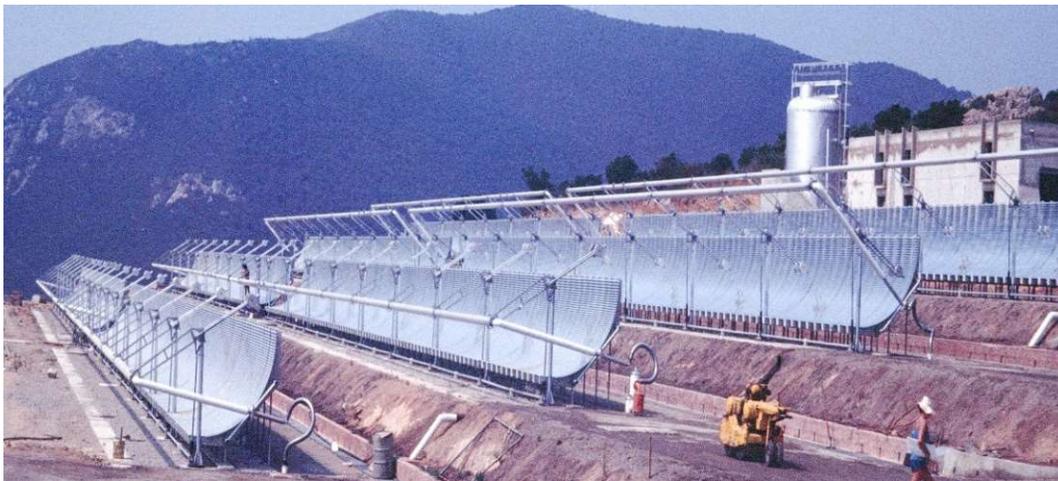


Figura 9-15: Central experimental en Córcega, Francia. Referencia [65].

9.4 CONCENTRADOR DE MÚLTIPLES ESPEJOS CÓNCAVOS GIRATORIOS

Se puede considerar dos tipos:

[65] Foto de los autores.

9.4.1 Concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un plano

Este sistema es también conocido como concentrador Fresnel lineal ^[66], dado que proyecta parte de un concentrador cilíndrico parabólico sobre un plano, como se muestra en la Figura 9-16.

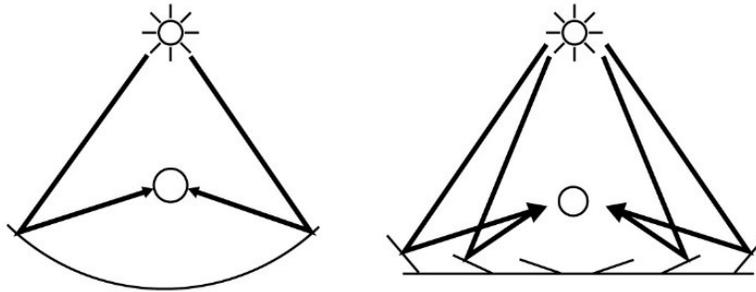


Figura 9-16: Proyección de un concentrador cilíndrico parabólico sobre un plano.

Está formado por un conjunto de espejos planos o ligeramente curvos, angostos y largos, cuyos ejes de rotación, para seguir el movimiento aparente del Sol, están ubicados sobre un plano. La inclinación necesaria de cada elemento, de forma a obtener un enfoque nítido en el receptor, está mostrada en la Figura 9-17. Es condición, para que se cumpla este ángulo, que los rayos solares incidan perpendicularmente a los ejes longitudinales de simetría de los espejos.

Tanto el plano de soporte, como los ejes de rotación, son fijos. Los espejos, que pueden tener un ancho igual o variable, están ubicados de manera tal que rotan a la misma velocidad angular, permaneciendo fija la zona de concentración.

El ángulo de inclinación (ψ), definido por aquel formado entre la perpendicular a la superficie del espejo y el eje vertical del sistema (ver Figura 9-18), será diferente para cada línea de espejos. La inclinación del elemento permite que cada rayo proveniente del Sol con ángulo (θ_s), sea reflejado al receptor que está situado a una altura (f) (punto focal) medida desde el plano horizontal de abertura del concentrador Fresnel lineal.

[66] J.H.Davison and A.J. Wendt. SLATS Line Focus solar collector. Actas ERDA Conference on Concentrating Solar Collectors. Georgia EE.UU., pag. 2-29 (1977).

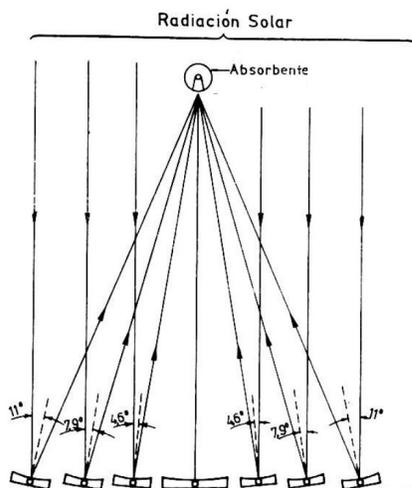


Figura 9-17: Concentrador de múltiples espejos cóncavos giratorios que tienen su eje de rotación en un plano. Cuando rotan a la misma velocidad angular, a fin de seguir el movimiento aparente del sol, se mantiene el foco nítido fijo.

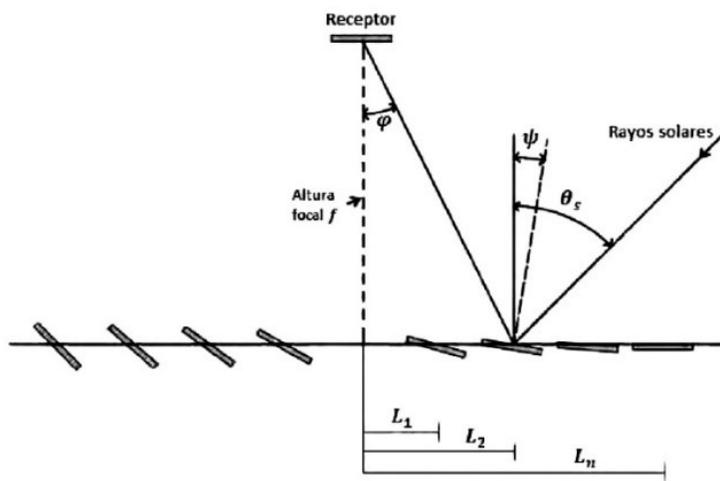


Figura 9-18: Marcha de los rayos que inciden sobre los espejos. Referencia [67].

En la referencia ^[67] se demuestra la siguiente relación entre el ángulo (ϕ) y la ubicación del espejo (n), o sea la distancia (L_n) desde la línea de rotación del mismo al eje de simetría del concentrador, y la altura (f), válida para las filas de espejo de ambos lados:

$$\tan \phi = \frac{L_n}{f} \quad (9-5)$$

así como la relación entre los ángulos:

[67] Tesis German Godínez Granados.
<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/772/1/17422.pdf>

$$\varphi = 2 \cdot \psi - \theta_s \quad \text{de donde} \quad \psi = \frac{\theta_s + \varphi}{2} \quad \text{para el lado derecho} \quad (9-6)$$

$$\varphi = \theta_s - 2 \cdot \psi \quad \text{de donde} \quad \psi = \frac{\theta_s - \varphi}{2} \quad \text{para el lado izquierdo} \quad (9-7)$$

o sea, la inclinación de cada línea de espejos respecto a la perpendicular.

Una línea de espejos no debe provocar sombra en la que le sigue, y la posición de los elementos debe ser la misma tanto del lado izquierdo como del derecho.

En la Figura 9-19 se muestra una central con concentradores Fresnel lineal en Calasparra, España.



Figura 9-19: Planta de concentradores tipo Fresnel lineal de Calasparra, España. Referencia [68].

9.4.2 Concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un cilindro

Este concentrador, desarrollado por R.P. Platzeck ^[69], consta de un conjunto de espejos cuyos ejes de rotación son generatrices de un cilindro soporte, no necesariamente en forma de círculo. En la Figura 9-20 se muestra un concentrador simétrico con apoyo circular y radio de curvatura (τ), que está representada por la distancia C-H en la imagen. Es constituido por $2n+1$ espejos de ancho (w_n) y radio de curvatura (r_n), dispuestos de manera que la distancia entre dos elementos sucesivos atienda el requisito de girar sin tocarse, estando fijo el receptor. El ángulo (Θ_n), con vértice en (F), define la posición del espejo (n) respecto al central; la sección del concentrador mostrada está contenida en el plano (P_t). El punto (C) indica el centro de curvatura del cilindro soporte y (F) la línea de cruce de los rayos reflejados en las generatrices medias de los espejos, siendo (f) la distancia \overline{HF} .

[68] <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/772/1/17422.pdf>

[69] R. P. Platzeck. Concentrador solar cilíndrico a espejos cóncavos giratorios. Actas de ASADES, 5ta. Reunión de Trabajo, 1979.

Los espejos están orientados para que los rayos, provenientes del centro del Sol y reflejados en las generatrices medias de aquéllos, se crucen a lo largo de una línea paralela al eje del cilindro, ubicada a la distancia (f) del eje de rotación del espejo central y contenida en un plano (S) perpendicular a (P_t).

Se denomina (Φ₀) al ángulo complementario del formado por el plano (S) y la proyección sobre el plano (P_t) de los rayos provenientes del Sol. En el caso que su valor sufra variación en (ΔΦ₀), los espejos deberán girar un ángulo (ΔΦ₀/2) para mantener fija la línea donde se cruzan los rayos reflejados.

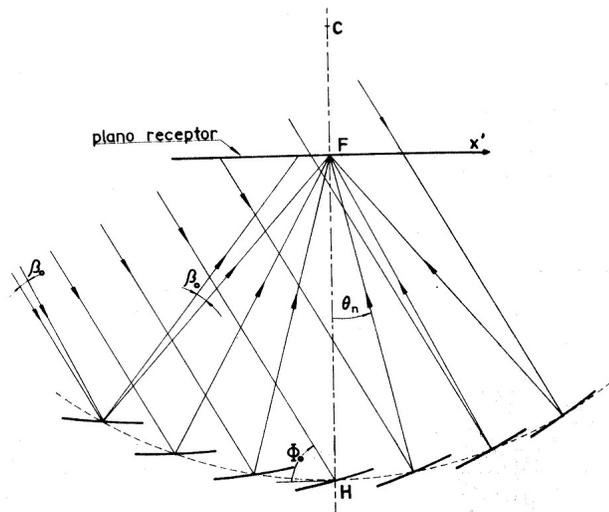


Figura 9-20: Sección del concentrador ubicado sobre plano (P_t) perpendicular al eje del cilindro. Referencia [69].

Entendiendo que los espejos son perfectos, el factor de concentración puntual ideal (C_{i(x')}), calculado en un punto de coordenada (x') del plano receptor, que está perpendicular al plano (S), es definido como el cociente entre la intensidad incidente sobre el punto (x') y la intensidad solar directa que se encuentra en el plano (P_t), conforme indica la Figura 9-20. Integrando la contribución al punto (x') de todos los elementos de superficie de un espejo y sumando todos los espejos, Platzcek [69] demuestra que (C_{i(x')}) es el dado en la Ecuación (9-8).

$$C(x') = \frac{2}{\pi} \sum_{n=-N}^N r_n \cdot \text{sen} \left(\frac{\Phi_0 + \theta_n + 90^\circ}{2} \right) \cdot \int_{\alpha_{\min}^n}^{\alpha_{\max}^n} \frac{\sqrt{a^2 - (X' - X'_c)^2}}{a^2} \cdot d\alpha \quad (9-8)$$

donde:

- (α) es una coordenada angular sobre cada espejo medida desde el centro de curvatura del mismo (-α^o_n ≤ α ≤ α^o_n), con α^o_n = w_n/(2r_n); es función de (η) y (α)
- (a) es el semieje mayor de la elipse, que corresponde a la dirección (x'), y (x'_c) es el centro de la misma; es función de (η) y (α)

(α_{max}^n) y (α_{min}^n) son los límites de integración que definen la zona del espejo que contribuye al flujo de energía en el plano receptor, y se calculan teniendo en cuenta las sombras y los apantallamientos entre espejos

9.5 CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO (CCP)

Estos concentradores son de foco lineal y consisten en una superficie cilíndrica de sección parabólica que refleja la radiación solar directa.

Una parábola es el conjunto de todos los puntos de un plano que son equidistantes de un punto fijo llamado foco, y de una recta fija llamada directriz, y está determinada por la siguiente ecuación (ver Figura 9-21):

$$(x-h)^2 = 4 p (y-k) \quad (9-9)$$

donde (p) es la distancia focal.

Con vértice en (0,0) y foco en (0,p), la Ecuación (9-9) se reduce:

$$x^2 = 4 p y \quad (9-10)$$

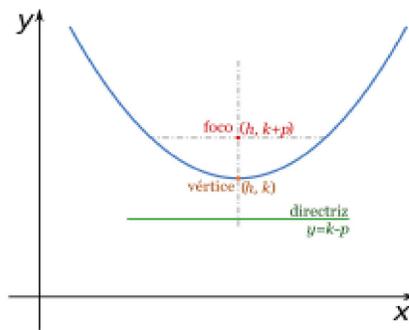


Figura 9-21: Parámetros de la parábola.

Para obtener un foco bien definido en un CCP, es necesario que en todo momento los rayos que inciden sobre él, provenientes del centro del Sol, sean paralelos al eje de simetría de la parábola (ver Figura 9-22). La radiación llega a esta con la línea central paralela al eje de simetría del concentrador, dentro de un ángulo de apertura de la radiación solar de (θ) . En la Figura 9-22 (ϕ_r) es el ángulo máximo de apertura de la parábola, (r_r) el radio del borde máximo, (D) ancho del receptor, y (W_a) apertura del concentrador.

Para un concentrador con el eje de rotación en la dirección norte-sur, esta radiación debe estar contenida en un plano perpendicular al de apertura del equipo, que pasa por el eje de simetría del cilindro, según se muestra en la Figura 9-23.

Esto sólo se puede lograr rotando el cilindro alrededor de un eje focal, siguiendo el movimiento del Sol.

Para el perfecto funcionamiento del proceso, debe haber un mecanismo que permita que el vector perpendicular al plano de apertura (ver Figura 8-3) y el vector de dirección de la

radiación solar incidente, conformen una superficie que coincida con el plano focal, que sea el plano de simetría del concentrador y que, por lo tanto, contenga al receptor. Con este montaje es posible obtener giros del colector alrededor de un sólo eje.

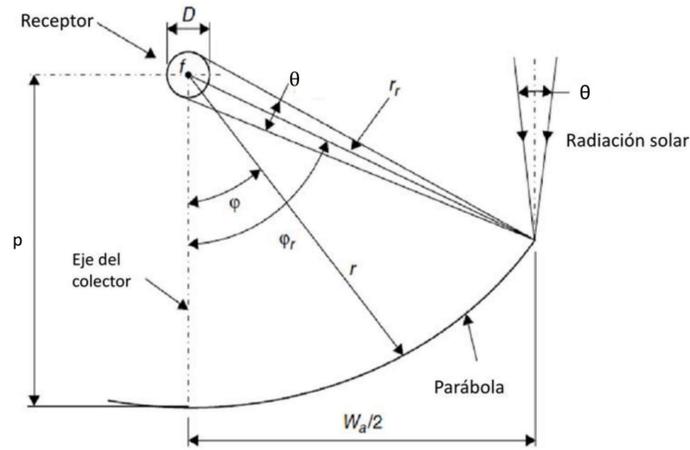


Figura 9-22: Dirección de los rayos para un CCP. Referencia [70].

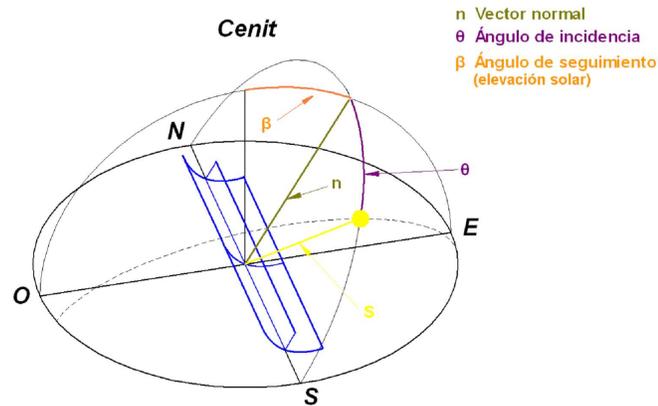


Figura 9-23: Concentrador cilíndrico parabólico.

Según la orientación del eje de movimiento, se pueden distinguir tres casos de montaje del sistema (ver Figura 9-24).

1. Dirección E-O y posición horizontal (la más habitual)
2. Dirección N-S y posición horizontal
3. Dirección E-O, inclinado respecto de la horizontal en un ángulo próximo a la latitud del lugar (orientación polar)

[70] <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/822/1/Jos%C3%A9%20Aguirre%20Reyes%2c%20Rufino%20Demill%C3%B3n%20MER.pdf>

Es posible también emplear el concentrador cilíndrico parabólico utilizando dos ejes de seguimiento, uno para la orientación en azimut y otro para corregir la altura, a fin de alcanzar un máximo en la colección de energía diaria, pero esto encarece el sistema.

Para el cálculo del ángulo de incidencia (θ), Rabl ^[71] establece dos relaciones, según se oriente el eje de rotación del colector:

Norte-sur:

$$\theta = \arccos (\cos \delta_s \cdot \sqrt{(\cos \phi \cdot \cos \omega_s + \tan \delta_s \cdot \sen \phi)^2 + \sen^2 \omega_s}) \quad (9-11)$$

Este-oeste:

$$\theta = \arccos (\sqrt{1 + \cos^2 \delta_s \cdot (\cos^2 \omega_s - 1)}) \quad (9-12)$$

Donde (ϕ) es la latitud, (δ_s) la declinación y (ω_s) el ángulo horario ^[72].

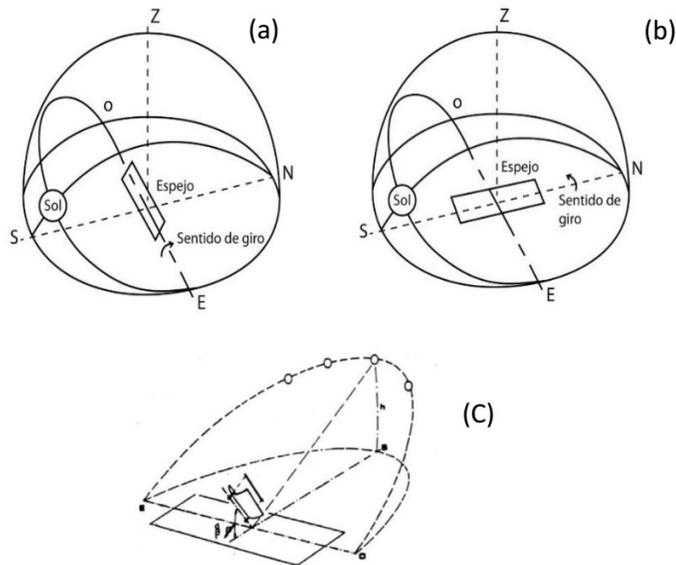


Figura 9-24: (a) y (b) muestran la posición horizontal orientada para el eje de rotación E-O (a) y N-S (b). (c) el eje de rotación inclinado respecto de la horizontal en un ángulo (β) próximo a la latitud del lugar. Referencia [73].

Para calcular el factor de concentración geométrica del CCP, ver la Figura 9-22.

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} = \frac{W_a}{D} \quad (9-13)$$

donde:

[71] A.Rabl. "Comparations of solar concentrators". Solar Energy 18, 93 (1976). "Yearly Average Performance of the principal collector types", SERI/TR-631-716 (1981).

[72] Ver Apéndice A para la definición de δ declinación y ω_s ángulo horario.

[73] S.A Kalogirou. (2016). Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition. San Diego: Academic Press.

$A_a = W_a L$ = área de apertura del concentrador
 $A_r = D L$ = área del receptor
 W_a = ancho de la apertura
 $D = 2 r_{receptor}$ = diámetro del receptor
 L = largo del concentrador

De la Figura 9-22 se obtiene que:

$$W_a = 2 \cdot r_r \cdot \text{sen}(\phi_r) \quad (9-14)$$

$$r_r = \frac{2 \cdot p}{[1 + \text{con}(\phi_r)]} \quad (9-15)$$

donde:

p = distancia al centro del foco
 ϕ_r = el ángulo máximo de apertura de la parábola
 r_r = radio del borde máximo

Además:

$$D = \frac{W_a \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\text{sen}(\phi_r)} \quad (9-16)$$

donde (θ) es el ángulo de apertura solar.

Reemplazando la Ecuación (9-15) en Ecuación (9-14), se tiene:

$$W_a = 4 \cdot p \cdot \text{sen}(\phi_r) / (1 + \text{con}(\phi_r))$$

Luego el factor de concentración es:

$$C_g = \frac{2 \cdot p \cdot \text{sen}(\phi_r)}{r_{receptor} \cdot (1 + \text{con}(\phi_r))} \quad (9-17)$$

Que se puede expresar como:

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2 \cdot p \cdot \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)}{r_{receptor}} \quad (9-18)$$

En la Figura 9-25 se muestra un ejemplo de un campo de concentradores cilíndricos parabólicos y la Figura 9-26 la Central de 354 MW en "Northern San Bernardino County", California, EE.UU.



Figura 9-25: Campo de concentradores cilíndricos parabólicos. Referencia [74].



Figura 9-26: Central de 354 MW en “Northern San Bernardino County”, California. Referencia [75].

9.6 CONCENTRADOR FIJO SEMIESFÉRICO

Está constituido por un sector de esfera fija, con eje de simetría inclinado en un ángulo que depende de su ubicación. Como puede verse en la Figura 9-27, el foco está distribuido y, dado el tamaño del Sol y la forma en que se va reflejando la radiación en la esfera, este

[74] https://www.researchgate.net/publication/325248453_Concentrador_Cilindro_Parabolico

[75] <https://www.rootsnshoots.org.uk/blog/2015/11/26/harnessing-the-power-of-the-sun/>

adquiere forma cónica, siendo el ángulo del cono igual al de apertura del disco solar, que es de 32 minutos.

Todo rayo que incide en el área de apertura del concentrador después de reflejarse una o dos veces, llega a la región del receptor comprendida entre (R) y $(R/2)$, donde (R) es el radio de la esfera.

El receptor cónico se mueve durante el día de forma tal, que su eje de simetría siempre se encuentra sobre la línea determinada por los centros del Sol y de la esfera. El área focal está preparada para el seguimiento del Sol, utilizando un movimiento biaxial. La forma de la región focal es independiente de la hora del día durante la cual se utilicen las diferentes secciones de la semiesfera.

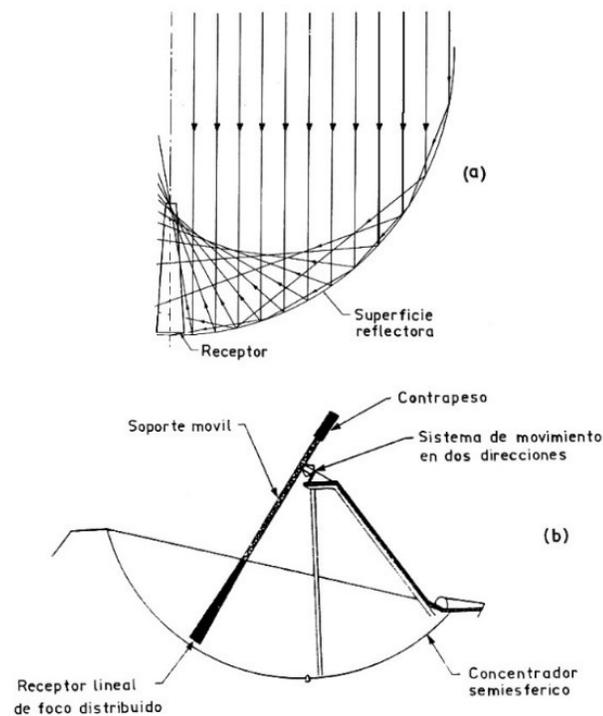


Figura 9-27: Concentrador fijo semiesférico. (a) Distribución focal. (b) Representación esquemática.

No se avanzó con este concentrador y solo algunos prototipos fueron desarrollados, conforme Figura 9-28.

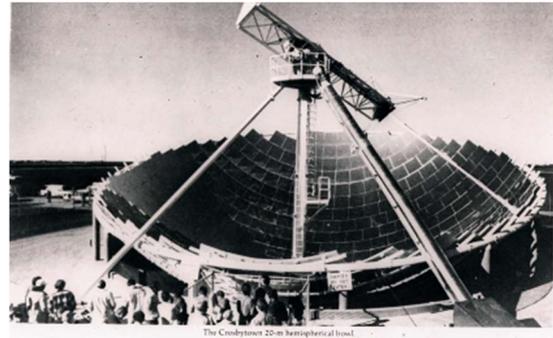


Figura 9-28: Prototipos de concentrador fijo semiesférico.

9.7 SISTEMA A TORRE CENTRAL

En este sistema, también conocido como sistema de receptor central con foco puntual, la concentración es realizada por medio de un campo de espejos, o sea, un conjunto de elementos planos o curvos, convenientemente distribuidos, que reflejan la radiación solar hacia un receptor-caldera, ubicado en la cúspide de una torre, donde se convierten en energía térmica (ver Figura 9-29).

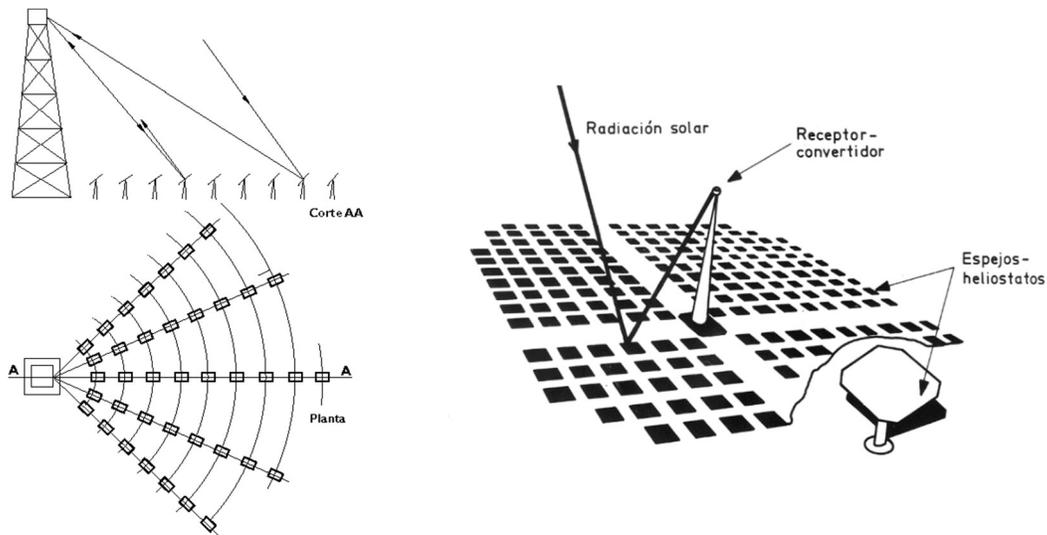


Figura 9-29: Sistema a torre central. En la izquierda se muestra una torre con campo de espejos de un sólo lado y a la derecha una centrada.

Los espejos están montados sobre heliostatos (ver Figura 9-30), que están constituidos por una superficie reflectora, una estructura soporte y un mecanismo de movimiento. La función de un heliostato es captar la radiación solar y proyectarla hacia un receptor. Para ello, es necesario que el vector perpendicular al plano del espejo bisecte el ángulo formado

entre el vector de incidencia solar y el de proyección (Figura 9-30). Dicho vector va del centro del espejo al punto deseado de incidencia. Esto se puede expresar por la ley de reflexión especular de la siguiente forma:

Ángulo de incidencia igual al de reflexión $\vec{i} \cdot \vec{n} = \vec{r} \cdot \vec{n}$

Los tres vectores pertenecen al mismo plano $(\vec{i} \times \vec{r}) \cdot \vec{n} = 0$

donde:

\vec{i} = dirección del rayo incidente

\vec{r} = dirección del ángulo reflejado

\vec{n} = dirección de la perpendicular a la superficie reflectante

Los helióstatos están distribuidos en forma tal que no se hagan sombra entre ellos, tanto para los rayos incidentes como para los reflejados. Para seguir el desplazamiento del Sol, estos tienen dos grados de movimiento, azimutal y por elevación (ver Figura 9-30).

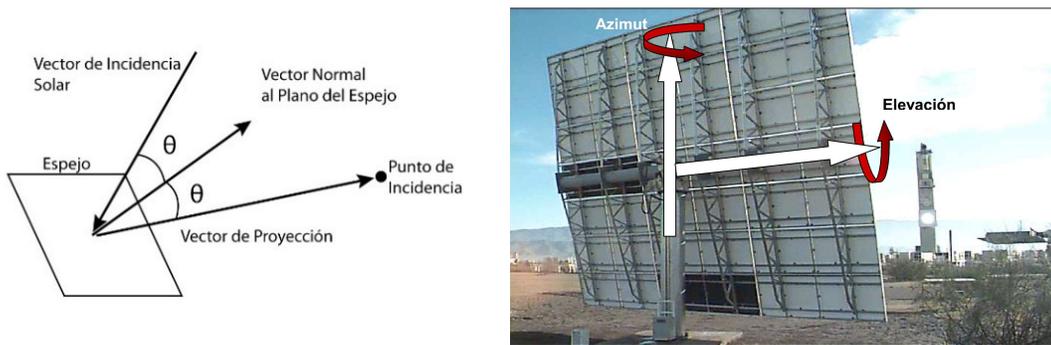


Figura 9-30: Ejemplo de helióstatos para seguir el movimiento del Sol y reflejar sus rayos a la Torre central. Referencia [76].

Los espejos reflectantes están formados normalmente por facetas, como puede verse en Figura 9-31.

La torre puede estar montada en uno de los extremos del campo de espejos, (ver Figuras 9-29, 9-32 y 9-33), o en el centro (ver Figuras 9-29 y 9-34).

[76] <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12857>



Figura 9-31: Un heliostato con los espejos formados por facetas. Referencia [77].



Figura 9-32: Sistema a Torre central de la planta experimental de Almería, España. Referencia [78].



Figura 9-33: Emprendimiento de Torre Central en Sevilla, España. PS10 (10 MW) y PS20 (20MW). Referencia [79].

[77] Heliostato en la estación experimental THÉMIS, Francia

[78] <https://news.solisclima.com/divulgacion/investigacion-y-desarrollo/la-plataforma-solar-de-almeria-psa>

[79] http://www.concentracionsolar.org.mx/images/pdf/tesis/david_marroqui.pdf



Figura 9-34: Sistema Solar Ivanpah. Desierto de Mojave, EE.UU. 390 MW. Formada por 3 módulos de 130 MW. Cada módulo tiene 100.000 espejos. Área total 13 km². Referencia [80].

En el sistema con la torre en el centro, para el hemisferio austral, los helióstatos que están al sur de la plataforma reflejan mejor su área que los del lado norte, debido a su ángulo de inclinación, como puede verse en la Figura 9-35, donde se muestra el eje óptico de los helióstatos respecto a la trayectoria de los rayos, siendo las pérdidas, que pueden ser del orden del 20 % de la radiación incidente, proporcionales al coseno del ángulo (θ) entre ambos (ver Figura 9-30). Para el hemisferio norte se aplica el mismo razonamiento, considerando los helióstatos respecto a la posición del Sol.

Respecto al fluido de trabajo, se puede usar agua/vapor o sales fundidas. En el primer caso, a la salida del receptor el vapor alcanza temperaturas entre 490 °C y 525 °C, y se puede expandir directamente en una turbina para generar electricidad, sin necesidad de un intercambiador intermediario.

Las sales fundidas más empleadas son mezcla binaria de nitrato de sodio y potasio, que pueden actuar como fluido de trabajo en el receptor y para acumular energía, dado que permanecen en estado líquido desde los 245 °C y son estables hasta los 565 °C. Es una alternativa que se está estudiando para almacenar energía a ser utilizada en las horas sin Sol.

[80] <https://www.greencitytimes.com/ivanpah-solar-electric-generating-system/>

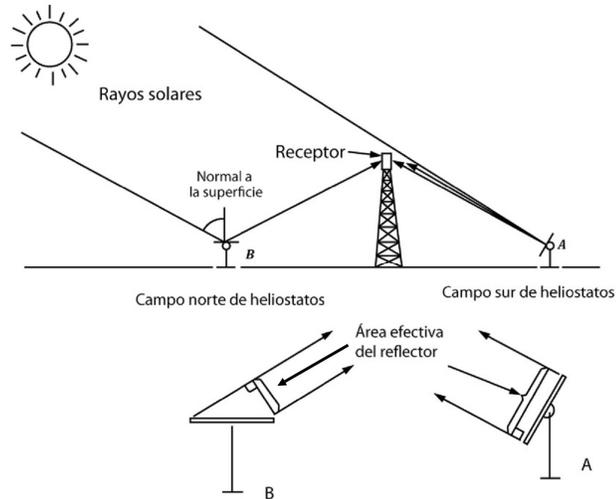


Figura 9-35: Sistema con torre central. Se indica el área efectiva de los reflectores de los helióstatos ubicados en el lado norte (B) y en el lado sur (A), considerando la instalación del conjunto en el hemisferio sur. Referencia [81].

9.8 CONCENTRADOR PARABOLOIDE DE REVOLUCIÓN

El concentrador es una superficie de revolución generada mediante la rotación de una curva plana de forma parabólica, denominada generatriz, que gira alrededor de una recta directriz, o eje de rotación, situada en el mismo plano de la curva, cuya expresión es la siguiente:

$$Z = \frac{x^2 + y^2}{4.f} \quad (9-19)$$

donde (x) e (y) son las coordenadas en el plano, y (z) es la que define los puntos de la superficie que salen del mismo. El sistema se caracteriza por tener un punto focal a una distancia (f) del vértice, donde todos los rayos que llegan paralelos al eje de la superficie son reflejados hacia el mismo (ver Figura 9-36).

El espejo parabólico concentra en un área pequeña de su foco, la energía de la radiación solar que incide sobre la abertura del concentrador, que tiene una superficie de varios metros cuadrados, convirtiéndola en energía térmica.

[81] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4260/fichero/Memoria+PFC%252FCap%C3%ADtulo+2.+Sistemas+de+Receptor+Central.pdf>. Adaptado por los autores.

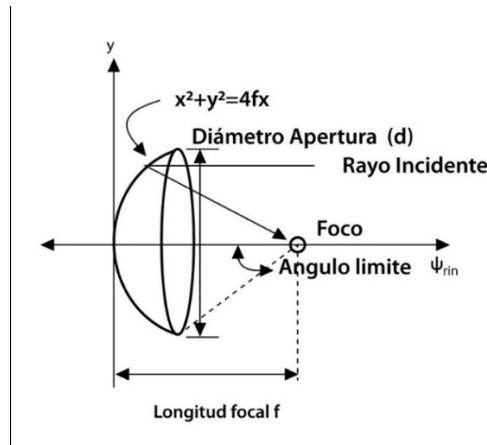


Figura 9-36: Paraboloide de revolución, donde (ψ_{rin}) es el ángulo de borde o “rim angle”, formado entre el eje del concentrador y el borde del mismo. Referencia [82].

Para obtener un foco nítido, la radiación solar debe incidir en forma paralela a los ejes de simetría del paraboloide de revolución, o sea, el vector perpendicular al plano de abertura debe coincidir con la dirección de los rayos solares incidentes. Para ello se requiere la composición de dos movimientos o giros, uno alrededor de un eje vertical y otro horizontal (ángulos α y Φ en Figura 9-37).

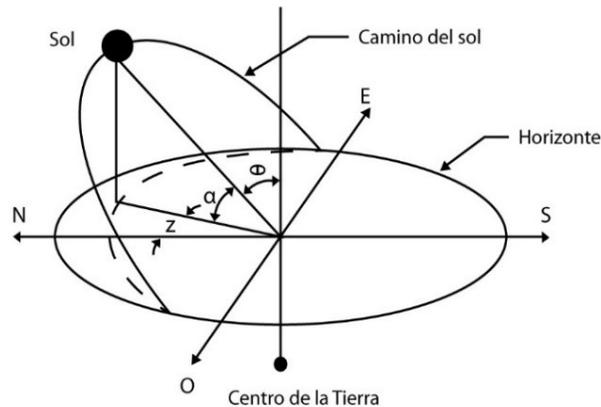


Figura 9-37: Dos ejes de rotación (α) y (Φ) para seguir el movimiento del sol.

Para este tipo de concentradores, los espejos paraboloides tienen un diámetro total que oscila entre 4 y 13 m y una distancia focal de 5 a 6 m.

De acuerdo a Stine y Harrigan [83], el área del concentrador se calcula como:

[82] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5027/fichero/CAPITULO+1.pdf>

[83] Stine, W. B., Harrigan, R. W. Solar energy fundamentals and design: With computer applications. Jan 1985, EE.UU.

$$A_{\text{concentrador}} = 4 \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \frac{\text{sen}^2(\psi_{\text{rim}})}{[1 + \cos(\psi_{\text{rim}})]^2} \quad (9-20)$$

donde (ψ_{rim}) es el ángulo de borde, que se expresa como:

$$\psi_{\text{rim}} = \tan^{-1} \left(\frac{f/d}{2 \cdot (f/d)^2 - 1/8} \right) \quad (9-21)$$

siendo (f) la distancia focal del concentrador y (d) el diámetro del mismo (ver Figura 9-36).

En la Figura 9-38 se muestran diferentes ángulos de curvaturas (ψ_{rim}) para el mismo diámetro del concentrador (d):

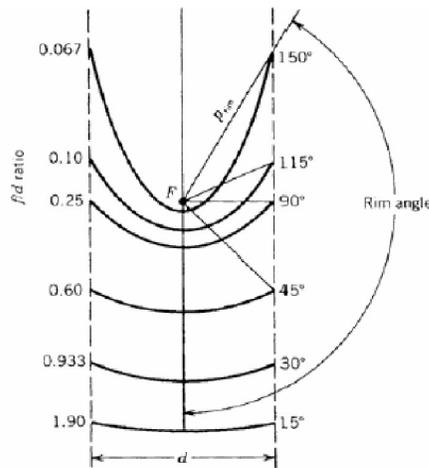


Figura 9-38: Diferentes curvaturas de concentradores parabólicos de revolución. Referencia [82].

Dado el elevado factor de concentración que se logra con estos sistemas, que puede llegar a varios miles, es posible alcanzar temperaturas de 900 a 1.000 °C con una eficiencia de 60-70 %. Por ello, los concentradores discos parabólicos se utilizan con motor Stirling^[84] en el foco, como unidad de conversión de potencia para generar electricidad directamente. El ciclo Stirling es el termodinámico más eficiente para transformar calor en energía mecánica o eléctrica; es un motor de combustión externa y su funcionamiento depende del aporte de calor que reciba.

En la Figura 9-39 se muestra un prototipo experimental de concentrador parabólico de revolución con un motor Stirling en la plataforma solar de Almería, España, y en la Figura 9-40 una central de 500 MW de potencia, la “The Stirling Energy Systems (SES)”, en California, EE.UU., donde cada parábola tiene 11,6 m de diámetro, y una potencia de 25 kW.

[84] Una descripción del funcionamiento del Motor Stirling se puede ver en Ref. [82] y en <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/7869>.



Figura 9-39: Concentrador paraboloide de revolución con un motor Stirling en la plataforma solar de Almería. Referencia [78].



Figura 9-40: The Stirling Energy Systems (SES) California, EE.UU. Referencia [85].

9.9 HORNO SOLAR DE ODEILLO

Un caso particular interesante de combinación de sistemas de concentración, es el horno solar de Odeillo, situado en el municipio de Font-Romeu-Odeillo-Via, en los Pirineos Orientales, Francia, que está operando desde 1970.

Este equipo funciona por concentración de los rayos solares mediante dos sistemas de espejos reflectantes. El primero está conformado por una serie de 8 filas de helióstatos, con 63 en cada una, totalizando 504 elementos, que están situados sobre una ligera cuesta,

[85] <http://www.stirlingenergy.com/about-us/index.html>

recogen los rayos solares y los transmiten para que incidan paralelos al eje focal de un enorme paraboloide de revolución, que es el segundo sistema (ver Figura 9-41). A continuación, los rayos convergen sobre la zona focal del concentrador, una superficie circular de 40 cm de diámetro y 18 m delante de la parábola. Usando este método, la temperatura en el objetivo puede alcanzar los 3.400 °C. Es de destacar que el fin de este dispositivo es obtener temperaturas limpias muy elevadas y no la generación de electricidad.

La característica del campo de helióstatos es que cada uno tiene 45 m² de superficie de espejo, lo que hace un total de 22.680 m² de área reflectante.

El paraboloide de revolución es caracterizado por su eje hacia el norte, distancia focal de 18 m, 40 m de altura, 54 m de ancho, superficie 1.830 m² y está conformado por 9.130 espejos.

En la Figura 9-41 se muestra un diseño del sistema y en la Figura 9-42 una vista del conjunto del horno y el detalle del paraboloide de concentración.

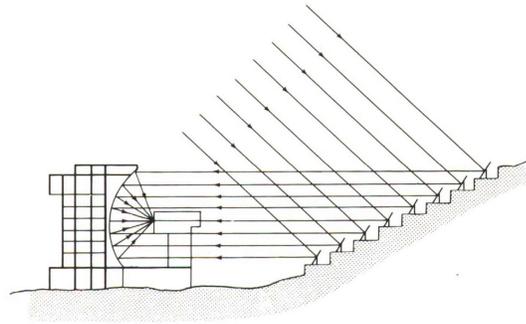


Figura 9-41: Disposición de los espejos reflectantes y el paraboloide de revolución del horno solar de Odeillo.

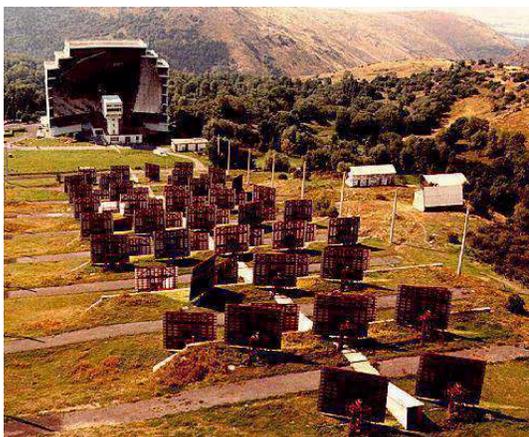


Figura 9-42: Vista del conjunto del horno y del paraboloide de revolución. Referencia [86].

[86] <https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>

9.10 MATERIALES

9.10.1 Superficie reflectora

Las superficies reflectoras de los concentradores se construyen, por lo general, espejando vidrios con la curvatura adecuada. Uno de los más eficientes es el llamado “borosilicato 3.3”, que tiene una transmitancia prácticamente constante en el rango de longitudes de onda del espectro solar, como se muestra en la Figura 9-43.



Figura 9-43: Transmisividad del vidrio borosilicato 3.3 para diferentes espesores.
Referencia www.schott.com.

Este material es relativamente fácil y económico de curvar, y es autoportante. En la terminología técnica, el espejado, generalmente de plata, es en la segunda superficie, o sea, en la parte de atrás del vidrio, de forma que la luz lo atravesase antes de reflejarse (ver Figura 9-44). De este modo, la placa reflectora está protegida del ataque de los agentes atmosféricos, en particular el rayado de las partículas arrastradas por el viento. Por último, la capa es recubierta con una pintura especial que incrementa su protección.

Los vidrios utilizados deben tener un bajo contenido en hierro ^[87] para evitar pérdidas por absorción de la radiación solar. El normalmente empleado es el vidrio conformado por flotación ^[88].

Para reducir los costos, en algunos casos se utiliza aluminio electropulido o film metalizado en lugar del vidrio. Para los lentes de Fresnel se emplea acrílico.

[⁸⁷] El óxido de hierro es un ingrediente común en el vidrio estándar porque reduce las temperaturas durante el proceso de fabricación. El vidrio con hierro tiene una coloración verdosa

[⁸⁸] El “vidrio flotado” consiste en hacer fluctuar el vidrio fundido sobre una capa de estaño licuado. Este método proporciona al elemento un grosor uniforme y una superficie muy plana.

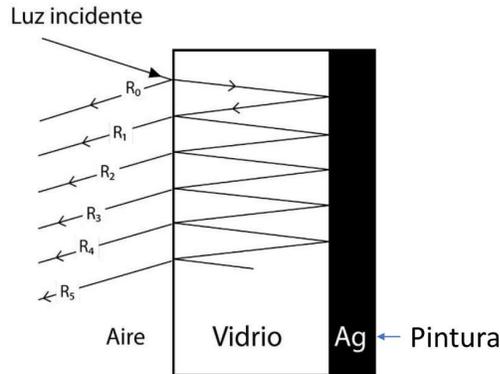


Figura 9-44: Incidencia y reflexión de la radiación solar en un vidrio espejado.

9.10.2 Receptor

El receptor está compuesto por uno o más tubos metálicos recubiertos con una película que absorbe la radiación solar, generalmente selectiva, y están contenidos en un compartimiento de vidrio para generar el efecto invernadero. Con el fin de evitar las pérdidas por conducción y convección interna, en algunos casos se realiza un procedimiento de vacío.

Como ejemplo, en la Figura 9-45 se muestra un corte de un concentrador cilíndrico parabólico y de su receptor.

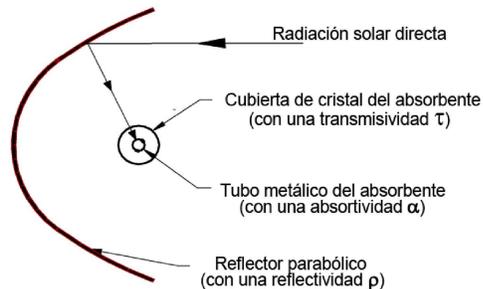


Figura 9-45: Corte de concentrador cilíndrico-parabólico y receptor. Referencia [89].

9.10.3 Superficie selectiva

Para el análisis de la eficiencia de una superficie selectiva en el receptor de un concentrador, se toman los resultados del trabajo presentado por J.C.Durán y J.A.Moragues^[28].

En la Figura 9-46 se puede ver el espectro de radiación solar incidente a nivel terrestre, en condiciones MA1, y los rayos que llegan al receptor con factores de concentración geométrica (C_g) entre 10 y 40, así como los espectros de radiación de un cuerpo negro para diferentes temperaturas, que en la imagen se muestran con líneas punteadas. Se indica también una superficie de absorción (α), igual a uno en el intervalo de radiación solar, y

[89] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70237/fichero/4.+CAPITULO+2.+INTRODUCCI%C3%93N.pdf>

cero para la zona del infrarrojo. Se observa que hay una superposición del espectro solar y el de radiación térmica, de modo que, aún en el caso ideal, no es posible una absorción total del primero sin la emisión del segundo.

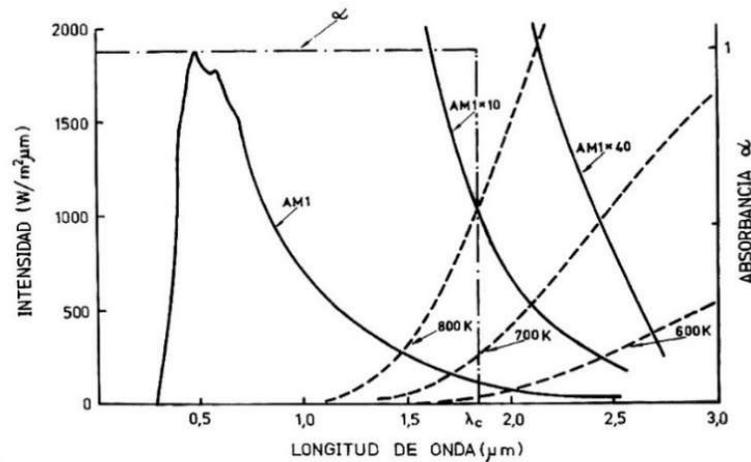


Figura 9-46: Superficie selectiva para un sistema de concentradores. Referencia [28].

El espectro de radiación incidente, lo cual equivale a la radiación solar multiplicada por el factor de concentración, y el espectro de emisión de un cuerpo negro a la temperatura de trabajo (T_r), se cruzan a una longitud de onda (λ_c), que se denomina “de corte”, y que depende de (T_r) y del factor de concentración. Para (C_g) mayores de 30 y (T_r) menores que 700 k, la longitud de corte óptima es mayor que 2 μm .

Para analizar la eficiencia de una superficie selectiva empleando concentradores, se considera un equipo de foco lineal, si bien las conclusiones obtenidas son de aplicación genérica.

El receptor es un caño rectangular de ancho (a), altura (b) y longitud (l). La cara inferior, sobre la que incide la radiación concentrada, está cubierta por una superficie con absorbanza solar (α) y emitancia térmica (ϵ). El fluido que circula no está a temperatura constante, por lo tanto, las pérdidas por radiación son variables a lo largo del receptor. La eficiencia de la superficie selectiva para un estado estacionario, independiente de las propiedades del fluido y del caño, es analizada bajo las siguientes hipótesis:

- Las pérdidas por convección y conducción son despreciables.
- Los efectos de la conducción térmica a lo largo del receptor son insignificantes.
- La temperatura en el receptor depende únicamente de una coordenada longitudinal, o sea, que es constante en toda sección transversal del caño.
- Las pérdidas por radiación se producen desde la parte inferior del receptor.

Partiendo de un balance de energía, para un diferencial de volumen ($a \cdot b \cdot dl$) se obtiene el tiempo que este debe tardar en recorrer el receptor, para que su temperatura varíe de (T_i) a (T_f). Las variaciones de (α), (ϵ), (C_e) y (δ) con aquella son despreciables.

$$\frac{\Delta t}{b \cdot \delta \cdot C_e} = \frac{1}{2 \cdot T_M^3 \cdot \alpha \cdot \varepsilon} \left[\frac{1}{2} \cdot \ln \frac{T_M + T_f}{T_M - T_f} + \operatorname{arctg} \frac{T_f}{T_M} - \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{T_M + T_i}{T_M - T_i} - \operatorname{arctg} \frac{T_i}{T_M} \right] \quad (9-22)$$

donde:

C_e = calor específico del fluido

Δ = densidad del fluido

I_s = radiación solar incidente

T_i = temperatura inicial del elemento de volumen

T_f = temperatura final del elemento de volumen

T_M = máxima temperatura alcanzable que corresponde al fluido en reposo dentro del receptor, dada por

$$T_M = \left[\frac{\alpha}{\varepsilon} \cdot \frac{I_s \cdot C_g}{\sigma} + T_a^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9-23)$$

donde:

T_a = la temperatura equivalente de la atmosfera

C_g = factor de concentración geométrico

Si se aprovecha totalmente la energía incidente sobre el receptor, el tiempo necesario para elevar la temperatura desde (T_i) a (T_f), citado en la Ecuación 9-23, pasa a ser:

$$\frac{\Delta t_0}{b \cdot \delta \cdot C_e} = \frac{\Delta T}{I_s \cdot C_g} = \frac{T_f - T_i}{T_s \cdot C_g} \quad (9-24)$$

Teniendo en cuenta que para (T_i) y (T_f) fijos, la energía total por unidad de tiempo (U) disponible y el flujo de energía (Q) que recibe la parte inferior del receptor, son inversamente proporcionales a (Δt) y (Δt_0) respectivamente, la eficiencia del equipo se expresa:

$$\eta = U/Q = \Delta t_0/\Delta t \quad (9-25)$$

De la Ecuación (9-23) se obtiene que la mínima intensidad ($I_s C_g$) necesaria para alcanzar la temperatura final requerida, depende de (T_a) y del cociente (α/ε), y no separadamente de (α) y (ε). Por el contrario, la eficiencia depende de (I_s) (C_g), (T_a), (α) y (ε) por separado.

En la Figura 9-47 se muestran curvas de eficiencia en función de la intensidad incidente sobre el receptor ($I_s \times C_g$), considerando tres superficies selectivas para las temperaturas ($T_i = 250^\circ \text{C}$) y ($T_f = 450^\circ \text{C}$), necesarias para la generación de electricidad. Para dos superficies con igual valor de (α/ε), la más eficiente es la que tiene mayor absorbancia solar.

Del gráfico se observa que la elección de una superficie selectiva apropiada depende fuertemente del factor de concentración; para (C_g) mayores de 40 es más importante una alta absorbancia solar que una alta selectividad. Cabe mencionar que como la temperatura en el receptor debe ser elevada (400 a 500 °C), la superficie que se emplee debe ser estable a esos valores.

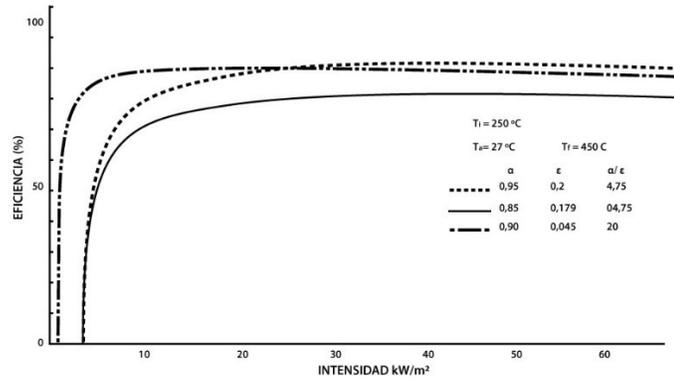


Figura 9-47: Eficiencia de tres superficies selectivas en función de la intensidad incidente sobre el receptor ($I_s \times C_g$). (T_i) es la temperatura inicial del fluido, (T_f) la final y (T_a) la equivalente de la atmosfera. Referencia [28].

A. ÁNGULOS DE REFERENCIA DEL SOL

A.1 POSICIÓN DEL SOL REFERIDA A UN SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL

Eligiendo un sistema de referencia compuesto por un eje vertical y dos contenidos en el plano horizontal, orientados hacia el sur y hacia el oeste, respectivamente, y definiendo la altura (h_s) y el azimut (γ_s) solar, la posición del Sol (ver Figura A-1) puede expresarse mediante la Ecuación A-1.

$$\vec{i}_s = \sin h_s \cdot \vec{V} + \cos h_s \cdot \cos \gamma_s \cdot \vec{S} + \cos h_s \cdot \sin \gamma_s \cdot \vec{W} \quad (\text{A-1})$$

donde:

h_s = altura solar, ángulo formado por los rayos solares y el plano horizontal.

γ_s = azimut del Sol, ángulo formado sobre el plano horizontal por el eje de dirección norte-sur y la proyección de los rayos solares sobre el plano.

A.2 POSICIÓN DEL SOL REFERIDA A UN SISTEMA DE COORDENADAS GEOCÉNTRICO

La posición del Sol puede también referirse a tres ejes ortogonales, cuyo centro sea el mismo que el de la Tierra (ver Figura A-2); el eje (N) coincide con aquel y su sentido positivo es hacia el polo norte. El eje (M) tiene su origen en el centro del planeta, está contenido en el plano del Ecuador, y pasa por la intersección del meridiano del lugar con dicho plano. El eje (W) también está contenido por el mismo, es perpendicular a los otros dos y su sentido positivo es hacia el oeste.

El ángulo de declinación solar (δ) es el formado por los rayos del Sol y el plano del Ecuador. Su valor varía a lo largo del año y puede ser obtenido de tablas específicas o calculado, con buena aproximación, utilizándose la Ecuación A-2 y teniendo en cuenta que (N) es el número de día del año:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[(284 + N) \cdot \frac{360}{365} \right] \quad (\text{A-2})$$

El ángulo horario (ω) es el formado entre el plano que contiene el meridiano del lugar y el que está atravesando el Sol en un momento dado. Este ángulo se mide a partir del mediodía solar y es positivo en dirección al crepúsculo. Dicho de otro modo, el ángulo horario es cuando el planeta gira entre dos momentos determinados, tomándose como referencia el meridiano local. Como la Tierra rota 360° en 24 horas, para cada 15° de rotación habrá transcurrido una hora.

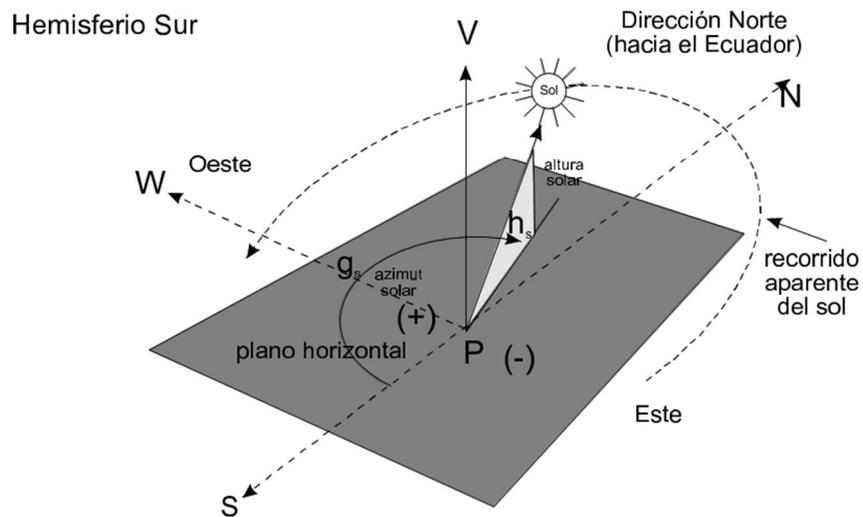
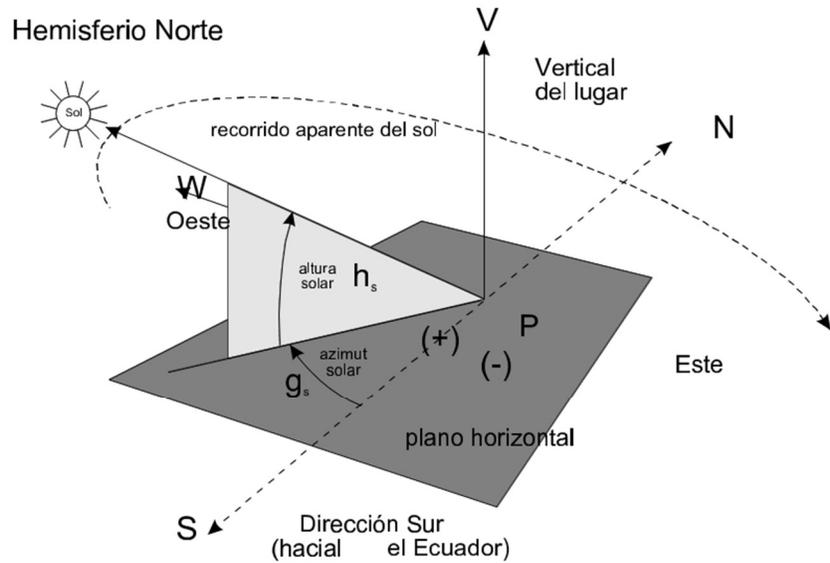


Figura A-1: Altura Solar y Azimut para cada hemisferio.

Observando la Figura A-3 se puede obtener el vector que define la posición del Sol con respecto a un sistema de coordenadas geocéntrico, mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{r}_{sg} = \sin \delta \cdot \vec{N} + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \vec{M} + \cos \delta - \sin \omega \cdot \vec{W} \quad (\text{A-3})$$

donde:

N = Eje de coordenadas cuya dirección coincide con el de rotación de la Tierra, sentido positivo hacia el norte.

M = Eje de coordenadas que pasa por el meridiano del lugar y está contenido en el plano del Ecuador.

- W = Eje de coordenadas perpendicular a N y M, de sentido positivo hacia el oeste.
P = Posición de un punto cualquiera sobre la corteza terrestre.
W = Ángulo horario, positivo hacia el oeste.

A.3 CAMBIO DE COORDENADAS

Por razones prácticas, es conveniente vincular la Ecuación A-3 al sistema de coordenadas locales (V, S, W) y para ello habrá que expresar los versores que definen los ejes de las coordenadas geocéntricas (N, M, W) en función de las locales. Observando la Figura A-3 se deduce que:

$$\left. \begin{aligned} \bar{N} &= \text{sen } \phi \bar{V} - \text{cos } \phi \bar{S} \\ \bar{M} &= \text{cos } \phi \bar{V} + \text{sen } \phi \bar{S} \\ \bar{W} &= \bar{W} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-4})$$

Reemplazando en la Ecuación A-3 lo definido en la Ecuación A-4 y agrupando términos se obtiene:

$$i = (\text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi + \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \omega) \bar{V} + (\text{cos } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{cos } \omega - \text{sen } \delta \cdot \text{cos } \phi) \bar{S} + \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \omega \cdot \bar{W} \quad (\text{A-5})$$

Resultado que define la posición del Sol respecto a un sistema de coordenadas local. La comparación de las Ecuaciones A-1 y A-5 permite determinar las siguientes igualdades:

$$\sin h_s = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi + \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{cos } \omega \quad (\text{A-6})$$

$$\cos h_s \cdot \cos \gamma_s = \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{cos } \omega - \text{sen } \delta \cdot \text{cos } \phi \quad (\text{A-7})$$

$$\cos h_s \cdot \sin \gamma_s = \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \omega \quad (\text{A-8})$$

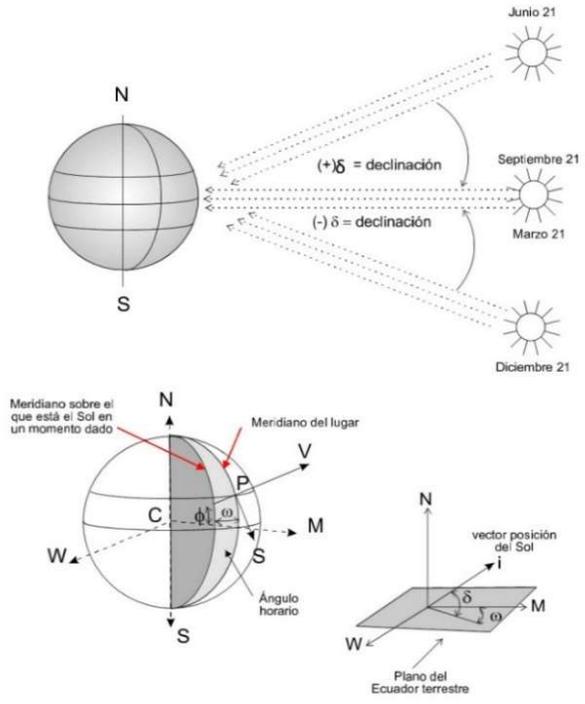


Figura A-2: Ángulo horario y declinación.

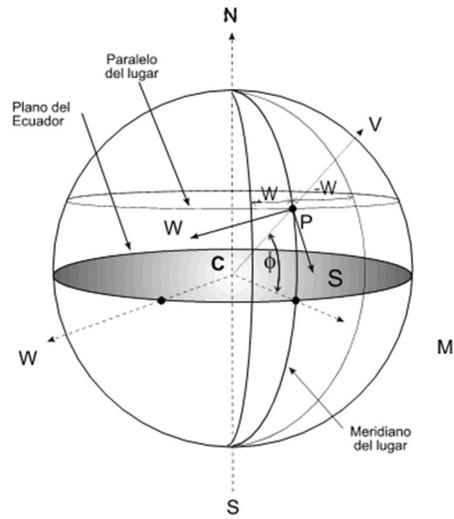


Figura A-3: Coordenadas Geográficas Geocéntricas y Locales.

Jaime A. Moragues

Doctor en Física, Instituto "José A. Balseiro", Universidad Nacional de Cuyo. Fue Investigador de CNEA y miembro de Carrera del Investigador del CONICET; Director Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de Energía, Secretaría de Energía de la Nación; Director Científico del Programa Nacional de Investigaciones de Energías No Convencionales, Secretaria de Ciencia y Técnica de la Nación; Director de Investigación y Desarrollo, CNEA; Director Programa "Energía, Ambiente y Transporte", Secretaría de Ciencia y Tecnología, Rectorado UTN. Recibió el premio "Teófilo Isnardi", Academia Nacional de Ciencias Exactas, Física y Naturales, trabajos en conjunto Física Nuclear Experimental. Desde 1975 trabaja en ambiente y energías renovables, en particular energía solar. Gerente de MR-Consultores. Es Miembro del Instituto de Energía de la Academia Nacional de Ingeniería; Coordinador Comité Editorial y Responsable Energía y Ambiente, Editorial Universitaria edUTecNe, UTN. Ha dictado numerosos cursos en universidades nacionales y del exterior y participado en congresos en el país y el extranjero. Cuenta con numerosas publicaciones científicas en revistas nacionales e internacionales y trabajos de consultaría en el país y el extranjero en temas de energía y ambiente.

Alfredo T. Rapallini.

Ingeniero Electromecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Buenos Aires; Investigador: del Observatorio Nacional de Física Cósmica; de la Comisión Nacional de Estudios Geoheliofísicos; de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales; de la Comisión Nacional de Energía Atómica; del Proyecto PERMER, Secretaria de Energía de la Nación. Director Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de Energía de la Secretaría de Energía de la Nación. Colaborador del Brace Research Institute de la Universidad Mc Gill de Montreal, Canadá. Gerente de MR-Consultores. Ha dictado numerosos cursos en universidades nacionales y del exterior y participado en congresos y seminarios en el país y el extranjero. Cuenta con numerosas publicaciones técnicas y científicas en revistas nacionales e internacionales y trabajos de consultaría en el país y el extranjero en temas de energía y ambiente. Falleció el 25 de septiembre del 2011.

<i>Prefacio</i>	4
Agradecimientos	5
1 Introducción	6
1.1. Fuentes de energía.....	7
2 Radiación térmica. Fórmulas fundamentales	10
2.1 Propiedades ópticas de los materiales	10
2.2 Propiedades de la radiación electromagnética	12
2.2.1 Ley de Planck.....	13
2.2.2 Ley de Wien.....	15
2.2.3 Ley de Stefan Boltzmann.....	16
3 Origen de la radiación solar y su composición espectral	18
3.1 Radiación solar incidente sobre la superficie terrestre	22
3.2 Aeromasa	25
3.3 Recurso energético disponible.....	30
4 Conversión fototérmica de la energía solar	32
4.1 Efecto invernadero.....	32
4.2 Superficies selectivas	34
4.2.1 Diferentes tipos de superficies selectivas	36
4.3 Estructura antirradiante.....	38
5 Colectores solares planos	40
5.1 Colector de placa plana.....	40
5.1.1 Cubierta transparente.....	41
5.1.2 Placa colectora y tubos o conductos de circulación.....	42
5.1.3 Aislación térmica	45
5.1.4 Caja.....	45
5.1.5 Sellos y burletes	45
5.2 Otros tipos de colectores planos	46
5.2.1 Colectores de placa plana sin cubierta.....	46
5.2.2 Colectores de tubos de vacío	47
5.2.3 Colectores planos con concentración	50
5.2.4 Estanques solares playos.....	51
6 Analisis termico y eficiencia	52
6.1 Distribución de temperaturas en un colector plano.....	52
6.2 Balance térmico de un colector solar plano	53
6.3 Coeficiente global de pérdidas del colector	55

6.4	Ecuación característica del colector solar plano; eficiencia	57
7	Sistema colector-termotanque.....	60
7.1	Convección natural	60
7.2	Convección forzada.....	64
8	Concentradores de radiación solar	65
8.1	Introducción.....	65
8.2	Factor de concentración geométrico, puntual y medio	69
8.2.1	Valores límites teóricos	71
8.3	Eficiencia térmica del sistema. Temperatura máxima.....	75
8.4	Eficiencia total instantánea.....	77
9	Descripción de los diferentes tipos de concentradores	81
9.1	Concentrador parabólico compuesto	83
9.2	Lentes de fresnel.....	87
9.3	Concentrador fijo a espejo facetado.....	88
9.4	Concentrador de múltiples espejos cóncavos giratorios.....	91
9.4.1	Concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un plano	92
9.4.2	Concentrador de espejos múltiples cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un cilindro ...	94
9.5	Concentrador cilíndrico parabólico (ccp).....	96
9.6	Concentrador fijo semiesférico.....	100
9.7	Sistema a torre central.....	102
9.8	Concentrador paraboloide de revolución.....	106
9.9	Horno solar de odeillo.....	109
9.10	Materiales	111
9.10.1	Superficie reflectora	111
9.10.2	Receptor	112
9.10.3	Superficie selectiva	112
Anexo	116
a.	Ángulos de referencia del sol	116
a.1	Posición del sol referida a un sistema de coordenadas local.....	116
a.2.	Posición del sol referida a un sistema de coordenadas geocéntrico.....	116
a.3.	Cambio de coordenadas.....	118
Acerca de los autores.....	120
Indice.....	121

Colectores Planos y Concentradores de Radiación Solar

Alfredo T. Rapallini

Jaime A. Moragues

La generación de energía térmica a partir de la radiación solar tiene un amplio rango de aplicaciones, a temperaturas bajas, media y altas.

En el presente libro no se van a discutir estas, sino que se analiza en detalle el funcionamiento de los colectores planos y los concentradores.

Se discuten las propiedades de la radiación electromagnética y sus leyes fundamentales (de Planck, de Wien y de Stefan Boltzman), el origen de la radiación solar y su composición espectral, y el proceso de conversión fototérmica de la misma.

Se ve en detalle los colectores de placa plana y más en general los sin cubierta, los estanques playos, planos con concentración y de tubo de vacío, así como el funcionamiento térmico y eficiencia de los mismos y del conjunto colectores-termotanque.

Se describen diferentes tipos de concentradores, tales como parabólico compuesto, lentes de Fresnel, fijo a espejo facetado, de múltiples espejos cóncavos giratorios con sus ejes dispuestos sobre un plano o un cilindro, cilíndrico parabólico, fijo semiesférico, a torre central y paraboloides de revolución, así como el grado de concentración de cada uno, las temperaturas alcanzadas y sus eficiencias.

edUTecNe

