

Energías renovables

Jaime González Velasco



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Registro bibliográfico (ISBD)

González Velasco, Jaime

Energías renovables / Jaime González Velasco. – Barcelona : Reverté, 2009

XII , 656 p. : il. ; 24 cm.

Índice.

DL B-29216-2009. – ISBN 978-84-291-7912-5

1. Centrales de energía. 2. Economía de la energía. I. Título.

620

Copyright © Jaime González Velasco

Edición en español

Copyright © Editorial Reverté, S. A., 2009

ISBN: 978-84-291-7912-5

MAQUETACIÓN: REVERTÉ-AGUILAR, S. L.



ESTE LIBRO HA SIDO PUBLICADO CON EL APOYO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Propiedad de:
EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Loreto, 13-15, Local B
08029 Barcelona
Tel: (34) 93 419 33 36
Fax: (34) 93 419 51 89
reverte@reverte.com
www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Impreso en España - *Printed in Spain*

Depósito legal: B-29216-2009

Impresión y encuadernación: Liberdúplex, S.L.U.

Prólogo

Vivimos en el seno de una sociedad que se basa en el desarrollo industrial para producir bienes y servicios que permiten su sostenimiento. Este modelo de sociedad, denominada sociedad industrial, y el de otra aún más avanzada, a la que se le da el nombre de sociedad postindustrial, precisan consumir cantidades ingentes de materias primas y de energía para su funcionamiento. Ambos tipos de consumo se relacionan entre sí, ya que sin consumir energía no sería posible elaborar las máquinas y dispositivos que permiten el funcionamiento físico del cuerpo social y, a su vez, el funcionamiento de estas máquinas y dispositivos contribuye al gasto energético.

La cantidad de energía que una sociedad consume y la eficiencia con la que la transforma y la utiliza constituyen hoy en día criterios que permiten diagnosticar su grado de desarrollo. Se han establecido correlaciones entre consumo energético y nivel de vida. Así, se puede afirmar que, en general, el incremento en el nivel de desarrollo de una nación está asociado a un mayor consumo energético y a una mayor capacidad en el uso y transformación de la energía de forma eficiente.

Existe un consumo de energía básico, que atiende a las necesidades de alimentación de los seres humanos. Se calcula que un hombre adulto que realiza una actividad moderada precisa de un aporte energético de alrededor de 2600 kcal por día. El hombre moderno, sin embargo, ha rebasado con mucho las fronteras del consumo básico de energía, de modo que actualmente el consumo de energía medio por habitante y año alcanza la cifra de 18 500 kWh, cifra diecisiete veces mayor que la energía estrictamente necesaria para su mera supervivencia.

Históricamente, las necesidades energéticas del ser humano fueron aumentando a medida que evolucionaba de hombre primitivo a recolector, cazador, agricultor y al hombre moderno de la sociedad industrial, hasta hacerse máximas en la denominada era tecnológica.

Las demandas energéticas de la sociedad actual se justifican por la necesidad de mantener en funcionamiento diversos sectores que permiten su supervivencia. Sectores como el de transporte, el doméstico, el comercial, el institucional, el industrial, el agrícola y el de construcción, contribuyen de forma decisiva a incrementar el gasto de energía, generando con ello problemas de enorme trascendencia para la subsistencia de la vida humana sobre la Tierra.

El consumo energético (en energía primaria) global por año se estima que alcanza una cifra de alrededor de 400 EJ por año (EJ = exajulio = 10^{18} julios = 1 trillón de julios), equivalentes a unas 10 000 megatoneladas de petróleo, frente a los 21 EJ en que se estima el consumo de energía en el año 1900. El 33% de esta energía se genera a partir de la combustión de petróleo, el 22,8% a partir de carbón, el 18,8% a partir de gas natural, el 13,8% a partir de biomasa, el 5,9% a partir de centrales hidroeléctricas y el 5,6% a partir de centrales nucleares.

Este elevado ritmo de consumo energético conlleva problemas de sostenibilidad, medioambientales, sociales y políticos.

Los problemas de sostenibilidad se refieren a la relación existente entre el ritmo de consumo energético en el momento actual y las reservas aún existentes de combustibles fósiles, que constituyen las fuentes de las que proviene la mayor parte de la energía consumida.

Los problemas medioambientales provienen de la emisión de diversos gases producto de la combustión de los combustibles fósiles, como el CO_2 , gas que tiene la capacidad de captar la radiación infrarroja y que contribuye al efecto invernadero. Este efecto es un proceso necesario para la vida en la biosfera, pues se calcula que si en la atmósfera no existieran moléculas de gases invernadero, la temperatura media de la biosfera sería de $-15\text{ }^\circ\text{C}$, en vez de los $15\text{ }^\circ\text{C}$ en que se estima la temperatura media en la era actual. Sin embargo, una concentración excesiva de estos gases puede contribuir a incrementar la temperatura en muy poco tiempo, con lo que se superaría la capacidad de muchas especies para adaptarse a un cambio tan rápido. También da lugar a un deshielo masivo que, según se calcula, puede producir un incremento del nivel medio de los mares de 0,5 metros, con el riesgo de que desaparezcan algunas regiones costeras en diversos países.

Otros gases producto de la combustión de petróleo o de carbón, como los óxidos de azufre o los de nitrógeno, son el origen de la lluvia ácida, que ha devastado amplias regiones vecinas a centrales térmicas.

Los problemas sociales y políticos tienen que ver con el hecho de que los combustibles fósiles aparecen en yacimientos masivos en determinadas regiones de la Tierra, lo que da lugar a tensiones entre países productores y consumidores.

Se han propuesto soluciones con el fin de superar la magnitud de este problema, o al menos de mitigarlo en parte. Entre ellas se encuentra el uso de las energías renovables. Se denominan energías renovables a aquellas cuyo flujo es repuesto, a partir de fuentes naturales, al mismo ritmo con que se consumen. La característica de estas fuentes es que están dispersas por todo el planeta (todas las regiones reciben luz

solar con mayor o menor intensidad e intermitencia o están sometidas a diversos regímenes de vientos, por ejemplo). La fuente de energía más importante es la luz solar. Podría afirmarse que los combustibles fósiles son “energía solar fosilizada”, almacenada en los enlaces de compuestos de carbono que son el producto de lentos procesos de transformación que tienen lugar a lo largo de eras geológicas.

La Tierra intercepta energía solar a un ritmo que equivale a 178 000 TW (teravatios), que equivalen a unas 13 000 veces los 13 TW que corresponden al ritmo de consumo de energía en el momento actual. De esta cantidad, un 30% se pierde por reflexión, mientras que un 50% es absorbido y da lugar a diferentes procesos: ciclos de evaporación de agua; ciclo hidrológico que produce la acumulación de depósitos de agua a diversas alturas, que representa energía potencial que se puede convertir con eficiencias elevadas en energía eléctrica; calentamientos diferenciales de distintas regiones geográficas que son el origen de los vientos; interacción de los vientos con la superficie de los mares, lo que genera los oleajes, que constituyen también depósitos de energía potencial y cinética. La radiación solar es almacenada por las plantas, por medio de la fotosíntesis, dando lugar a la formación de proteínas, carbohidratos y grasas, es decir, a alimentos y combustibles. Esta radiación solar se puede convertir directamente en electricidad mediante dispositivos fotovoltaicos, o se puede utilizar para calentar agua para calefacción y usos domésticos. Otra fuente de energía es la mareomotriz, que surge de una conjugación entre las interacciones gravitacionales de la Tierra y la Luna y la fuerza centrífuga asociada al movimiento de rotación de aquella. Por último, los seres humanos han venido utilizando desde hace milenios las fuentes geotérmicas, allí donde estaban a su alcance, para calentarse o para cocinar. Hoy en día se pueden utilizar rocas graníticas con calor acumulado procedente del interior de la Tierra para producir electricidad.

En este libro, que es el resultado de diez años de actividad docente, se trata de hacer un estudio introductorio de las diversas formas de energía renovable. En cada uno de los capítulos se proporciona una descripción rigurosa de los principios físicos en que se basa la utilización de una determinada fuente de energía, una breve historia de su utilización, una descripción bastante pormenorizada de los dispositivos necesarios para cosechar la energía, una estimación de las eficiencias de conversión que se pueden alcanzar con los mismos, una discusión de los efectos medioambientales a que da lugar su uso, la posibilidad de su integración en las grandes redes de distribución de energía y un cálculo aproximado del coste de cada unidad energética producida en comparación con el coste de la misma producida en una central térmica, así como las perspectivas futuras en su aprovechamiento.

Este libro trata de facilitar la enseñanza universitaria de las energías renovables a un nivel correspondiente a segundo o tercer curso de una Licenciatura en Ciencias o Ingeniería. El estudio de esta materia requiere conocimientos de Química General, Física, Matemáticas, Geología y Biología correspondiente a un primer curso de una Licenciatura en Ciencias o Ingeniería.

Se ha intentado hacer una descripción simplificada pero rigurosa de los diversos temas con el fin de hacerlos accesibles a personas en formación y que además contribuya a formar los profesionales en el campo de las energías renovables que serán necesarios en el futuro.

Jaime González Velasco
Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias.

Índice analítico

Prólogo.....	v
1. Energías renovables	1
1.1 Definición de energía, dimensiones físicas y unidades de medida	6
1.2 Potencia	12
1.3 Conversión de energía y eficiencia de conversión	12
1.4 Consumo energético	16
1.5 Formas de utilización de la energía. Ahorro energético	21
1.6 Problemas originados por los usos energéticos de la sociedad actual	28
1.7 Problemas medioambientales	29
1.8 Problemas de sostenibilidad	42
1.9 Problemas sociales	46
1.10 Una posible solución: las fuentes de energía renovables	46
2. Aprovechamiento térmico de la energía solar	59
2.1 Naturaleza y disponibilidad de la radiación solar	61
2.2 Variación de la insolación diaria con la latitud y con la estación del año	68
2.3 Mecanismos de pérdida de calor	77
2.4 Colectores solares	89
2.5 Calor solar pasivo. Arquitectura bioclimática	106
2.6 Generación de energía eléctrica a partir de energía solar térmica de alta temperatura	119
2.7 Motores solares	129
2.8 Estanques solares y sistemas de desalinización de agua	132

3.	Energía solar. Dispositivos fotovoltaicos	139
3.1	Introducción histórica	142
3.2	Fundamentos físicos del funcionamiento de una heterounión	144
3.3	Formación de las bandas de valencia y de conducción en semiconductores intrínsecos	149
3.4	Niveles energéticos en semiconductores intrínsecos. Modelo de los pozos de potencial	152
3.5	Semiconductores extrínsecos	156
3.6	Formación de una unión p-n	161
3.7	Radiación solar	171
3.8	Fabricación de células fotovoltaicas	196
3.9	Aspectos económicos de los sistemas fotovoltaicos	211
3.10	Impacto medioambiental de los sistemas fotovoltaicos	213
4.	Energía a partir de biomasa	217
4.1	Contribuciones de la biomasa al consumo primario de energía en el mundo, en la Comunidad Europea y en España	225
4.2	El proceso fotosintético	229
4.3	Biocombustibles	242
4.4	Aprovechamiento energético de la biomasa	249
4.5	Pirólisis y gasificación	253
4.6	Tratamientos bioquímicos de la biomasa	258
4.7	Digestión anaeróbica	263
4.8	Aprovechamiento de residuos agrícolas	276
4.9	Impactos medioambientales del uso de la biomasa	285
5.	Energía eólica	287
5.1	Introducción	288
5.2	Turbinas eólicas de eje horizontal	300
5.3	Turbinas de eje vertical	301
5.4	Fuerzas aerodinámicas que actúan sobre una paleta de turbina eólica	303
5.5	Fundamentos teóricos del funcionamiento de turbinas eólicas	317
5.6	Par rotor	328
5.7	Turbinas en las que la fuerza directriz es la de arrastre	331
5.8	Acoplamiento dinámico	333
5.9	Ampliaciones de la teoría del momento lineal	338
5.10	Estimación de la potencia y energía que se puede extraer con las turbinas eólicas	340
5.11	Impacto medioambiental de los dispositivos para el aprovechamiento de la energía eólica	350
5.12	Aspectos económicos de la energía eólica	357
5.13	La energía eólica en la Unión Europea y en España	362
6.	Energía hidráulica	369
6.1	Introducción	370
6.2	Historia de la utilización de la energía hidráulica	373
6.3	Estimación de los recursos hidroeléctricos totales	376

6.4	Cálculo de la presión hidrostática ejercida por una determinada altura de agua	384
6.5	Estimación del salto, el caudal y la potencia extraíble en un determinado lugar	389
6.6	Tipos de turbinas utilizadas en centrales hidroeléctricas	391
6.7	Velocidad de chorro y tamaño de inyector	396
6.8	Criterios de diseño de turbinas Pelton. Velocidad angular y tamaño de turbina	397
6.9	Turbinas Turgo y de flujo cruzado	401
6.10	Turbinas de reacción	402
6.11	Turbinas tipo hélice	407
6.12	Criterios de selección de la turbina más adecuada. Velocidad específica e intervalos de aplicación	410
6.13	Efectos medioambientales de las centrales hidroeléctricas	420
7.	Energía mareomotriz	425
7.1	Introducción	426
7.2	Estimación de recursos mareomotrices a escala mundial	428
7.3	Cálculo del valor de la amplitud, R, de la onda generada en los océanos por las interacciones gravitatorias Tierra-Luna y por su rotación alrededor de un centro de masas	431
7.4	Cálculo de las fuerzas, F_x y F_y , que actúan sobre una masa de agua, m, situada en los puntos X e Y de la superficie de la Tierra	433
7.5	Cálculo de la altura que alcanza la masa m de agua en X e Y sobre el nivel del resto del mar	436
7.6	Efectos que contribuyen a la intensificación de las mareas	442
7.7	Electricidad a partir del salto generado en presas por las mareas	448
7.8	Presas mareomotrices	450
7.9	Tipos de turbinas para la generación de electricidad en centrales mareomotrices	453
7.10	Problemas medioambientales	460
7.11	Electricidad a partir de corrientes de marea	461
8.	Energía a partir del oleaje	469
8.1	Introducción	470
8.2	Principios físicos de la energía asociada al oleaje	472
8.3	Dispositivos flotantes	495
8.4	Otros dispositivos convertidores de energía del oleaje	501
8.5	Impactos medioambientales de los dispositivos convertidores de energía del oleaje	507
8.6	Aspectos económicos y de integración en la red de la energía eléctrica producida a partir del oleaje	508
8.7	Conclusiones	509
8.A	Apéndice. Energía y potencia del oleaje	510
9.	Conversión de energía térmica oceánica	515
10.	Energía geotérmica	521
10.1	Introducción	522
10.2	Magnitud de los recursos geotérmicos	523
10.3	Origen y características de la energía geotérmica	524

10.4	Origen del calor geotérmico	528
10.5	Clases de regiones geotérmicas	533
10.6	Física de los recursos geotérmicos	534
10.7	Conductividad hidráulica de rocas	537
10.8	Características de las fuentes geotérmicas de alta entalpía	539
10.9	Calor a partir de cuencas sedimentarias	542
10.10	Calor a partir de rocas secas calientes	544
10.11	Formas de explotación de recursos geotérmicos	547
10.12	Técnicas de extracción y explotación de recursos geotérmicos	557
11.	Almacenamiento y distribución de energía	569
11.1	Introducción	570
11.2	Almacenamiento biológico	573
11.3	Almacenamiento químico	573
11.4	Acumuladores	580
11.5	Células de combustión	592
11.6	Almacenamiento mecánico de energía	613
11.7	Almacenamiento de energía en forma de aire comprimido	617
11.8	Almacenamiento de energía calorífica	618
11.9	Distribución de energía	621
	Bibliografía	633
	Índice alfabético	635

Capítulo 2

Aprovechamiento térmico de la energía solar

2.1	Naturaleza y disponibilidad de la radiación solar	61
2.2	Variación de la insolación diaria con la latitud y con la estación del año ..	68
2.3	Mecanismos de pérdida de calor.....	77
2.4	Colectores solares	89
2.5	Calor solar pasivo. Arquitectura bioclimática.....	106
2.6	Generación de energía eléctrica a partir de energía solar térmica de alta temperatura	119
2.7	Motores solares.....	129
2.8	Estanques solares y sistemas de desalinización de agua.....	132

Los flujos que la Tierra recibe de las denominadas energías renovables derivan, en su mayor parte, de la energía radiante procedente del Sol que intercepta la Tierra. La radiación electromagnética proveniente del Sol es la responsable de la existencia de todas las formas de vida que se han producido en eras pretéritas y de las existentes en el presente. Para que la vida pueda desarrollarse en la diversidad de formas en que aparece, en la atmósfera son necesarias determinadas condiciones de temperatura, presión y concentración de oxígeno, e incluso la existencia de moléculas con efecto invernadero, que son una consecuencia de procesos desencadenados por la energía que llega desde el Sol.

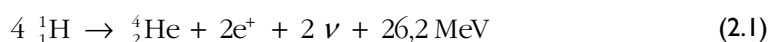
Los seres humanos reconocieron desde antiguo la conexión que el Sol tiene con la vida y los ciclos de la Naturaleza, e inicialmente lo consideraron como una deidad. Más adelante aprendieron a hacer uso racional de la luz y el calor. En el momento presente se consigue hacer un uso directo de la radiación solar aprovechando de forma activa la radiación térmica por medio de *colectores solares*, que son dispositivos que convierten energía radiante en *calor de baja temperatura* ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$), para suministro de calefacción y agua caliente en viviendas y edificios institucionales y para calentar el agua de piscinas. Otra forma de aprovechamiento de la energía solar térmica se lleva a cabo en los *motores térmicos solares*. En estos dispositivos se consiguen, por medio de *concentradores de radiación*, temperaturas suficientemente elevadas como para evaporar un fluido y dotarlo de una energía de expansión que permite imprimir rotación a rotores de turbinas, cuyo eje transmite energía cinética de rotación al eje de un generador eléctrico, dando lugar a la producción de electricidad, una forma de energía de grado elevado. Estos procesos de transformación de energía térmica, que es una energía de bajo grado termodinámico, en energía eléctrica, de grado termodinámico elevado, son de rendimiento bajo, como se explicó en el capítulo anterior, y su eficiencia de conversión ideal es la de un ciclo de Carnot. Por lo tanto, dicha eficiencia crece al aumentar la temperatura de la fuente caliente y disminuir la temperatura de expulsión del vapor o de los gases que salen de la turbina. Por ello se están investigando sistemas concentradores de radiación que permitan alcanzar temperaturas elevadas, con el fin de conseguir eficiencias de conversión de calor en electricidad lo más elevadas que sea posible.

Otra forma de hacer uso de la energía térmica solar es por medio de los sistemas de *calefacción pasiva*. Se trata de conseguir que paredes, muros o cualquier otro elemento empleado en la construcción de un edificio sea capaz de absorber directamente la energía solar, de modo que reduzca o satisfaga totalmente las necesidades de calefacción del mismo. En los sistemas de calefacción pasivos se hace uso de corrientes convectivas de aire para hacer circular la energía solar almacenada en un muro u otro componente del edificio.

Una forma más general de aprovechamiento de la energía solar térmica consiste en construir los edificios basándose en proyectos que permitan un uso mínimo de calefacción e iluminación artificiales. En estos casos, los arquitectos tienen que tener en cuenta las características climáticas y la latitud del lugar donde se construye el edificio, la orientación del mismo y de sus espacios interiores, y deben buscar un uso inteligente de sombras y materiales aislantes. A esta forma de construir se le denomina *arquitectura bioclimática* y, en realidad, ha sido utilizada en todas las épocas históricas. Con este tipo de edificios se trataría de conseguir un gasto energético mínimo y, consiguientemente, una mínima contaminación ambiental.

2.1 Naturaleza y disponibilidad de la radiación solar

La energía radiante proveniente del Sol tiene su origen en una serie de reacciones de fusión, de las cuales la más importante es aquella en que cuatro átomos de hidrógeno se fusionan para dar un átomo de helio, dos positrones y dos neutrinos según la Ecuación 2.1:



En la reacción se produce una transformación de masa en energía, de acuerdo con la ecuación de Einstein: $E = \Delta m c^2$, que explica la emisión de 26,2 MeV de energía radiante ($26,2 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 4,19 \times 10^{-12} \text{ J}$) por cada cuatro átomos de hidrógeno que se fusionan. Así, por cada cuatro gramos de hidrógeno fusionados se producirían $(4,19 \times 10^{-12} \text{ J}/4 \text{ átomos}) \times 6,023 \times 10^{23} \text{ (átomos/átomo gramo)} \times 4 \text{ átomos gramo} = 2,52 \times 10^{12} \text{ J}$, o bien $2,52 \times 10^{12} \text{ J} \times 250 = 6,3 \times 10^{14} \text{ J/kg} = 631 \text{ TJ kg}^{-1} = 631 \text{ 210 GJ kg}^{-1}$. De acuerdo con el valor de la constante solar, el Sol emite energía al espacio a un ritmo de $3,85 \times 10^{26} \text{ W}$. Para ello, si toda la energía generada proviniera de la reacción de fusión del hidrógeno, debería consumir 611 millones de toneladas de hidrógeno por segundo, de acuerdo con el cálculo siguiente:

$$(6,3 \times 10^{14} \text{ J/kg}) (x \text{ Ton/s}) 10^3 \text{ kg/Ton} = 3,85 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

$$\begin{aligned} x = \text{Toneladas de hidrógeno consumidas por s} &= \frac{3,85 \times 10^{26} \text{ J/s}}{6,3 \times 10^{14} \frac{\text{J}}{\text{kg}} \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{Ton}}} = \\ &= 6,11 \times 10^8 \text{ Ton/s} \end{aligned}$$

De esta cantidad, la Tierra intercepta el $4,57 \times 10^{-8}\%$, es decir, a la Tierra está llegando energía radiante a un ritmo de $3,85 \times 10^{26} \text{ W} \times 4,57 \times 10^{-10} = 175 \text{ 945} \times 10^{12} \text{ W} = 175 \text{ 945 TW}$, que se ha de comparar con el ritmo global

actual de consumo de energía primaria, que es de 13 TW. Por lo tanto, el ritmo al que llega energía solar a la Tierra es 13 534 veces el de consumo por los seres humanos, en el momento actual. Si se divide $3,85 \times 10^{26}$ W por la superficie de la esfera con centro en el Sol y radio igual a la distancia media Sol-Tierra = $r_0 = 150 \times 10^6$ km = $1,5 \times 10^{11}$ m, se tiene:

$$\text{Constante solar} = G_0 = \frac{3,85 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi r_0^2} = \frac{3,85 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi (1,5 \times 10^{11})^2 \text{ m}^2} = 1362 \text{ Wm}^{-2} \quad (2.2)$$

Otra forma de obtener un valor para la constante solar justo fuera de la atmósfera es considerar al Sol y a la Tierra como dos esferas situadas a una distancia $d = 1,498 \times 10^{11}$ m. El Sol, cuyo diámetro es $1,392 \times 10^9$ m, se considera que se comporta como un cuerpo negro que emite a una temperatura $T_S = 5780$ K. La constante de Stefan–Boltzmann vale $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. La potencia total recibida a través de una esfera de radio igual a la distancia Tierra–Sol, será igual a la potencia por m^2 en ese punto, que es G_0 multiplicada por la superficie total de la esfera, $4\pi d^2$. Esa potencia es igual a la emitida por un cuerpo negro que tuviera la misma superficie que el Sol, que viene dada por $S_S = 4\pi R_S^2$. Por lo tanto, se cumple que Potencia emitida por el Sol = Potencia a distancia d , es decir:

$$\sigma T_S^4 (4\pi R_S^2) = G_0 (4\pi d^2); \quad (2.3)$$

Despejando ahora G_0 , se tiene:

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{\sigma T_S^4 (4\pi R_S^2)}{4\pi d^2} = \frac{(5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} 5780\text{K})^4 4\pi \left(\frac{1,392 \times 10^9 \text{ m}}{2}\right)^2}{4\pi (1,5 \times 10^{11} \text{ m})^2} = \\ &= 1362 \text{ W m}^{-2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

La constante solar, G_0 , es decir, la cantidad de energía radiante que llega hasta el límite de la atmósfera por unidad de superficie, dispuesta perpendicularmente a la dirección de la radiación incidente, y por unidad de tiempo, tiene un valor de 1367 W/m^2 con un error del 1%, cuando se toma la distancia media Tierra–Sol, la denominada unidad de longitud astronómica.

La trayectoria que describe la Tierra alrededor del Sol es una elipse, denominada *eclíptica*, uno de cuyos focos está ocupado por el Sol. La eclíptica es excéntrica, por lo que la irradiancia o energía solar que alcanza la Tierra varía para cada día del año siguiendo una curva como la de la Figura 2.1.

El valor de G_0 varía con el día del año de acuerdo con la ecuación:

$$G_0(n) = 1367 \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] [\text{W m}^{-2}] \quad (2.5)$$

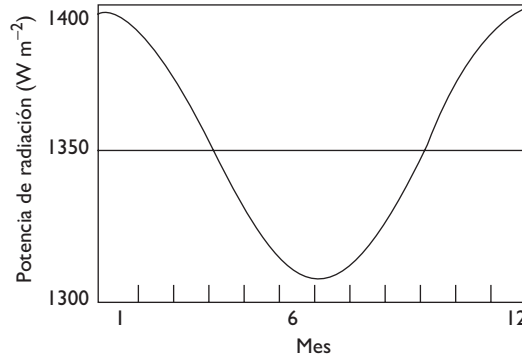


Figura 2.1 Variación de la constante solar a lo largo del año a causa de la trayectoria elíptica de la Tierra alrededor del Sol, lo que da lugar a una variación de la distancia Tierra-Sol de alrededor del 1,7%. Puede observarse que, como consecuencia de ello, la potencia de la radiación solar fuera de la atmósfera varía en aproximadamente un 3%.

donde n es el número de orden del día en el año, es decir, el día 1 de enero tiene $n = 1$, y el 31 de diciembre, $n = 365$.

La potencia de la radiación solar fuera de la atmósfera, $G_0 = 1362 \text{ W m}^{-2}$, sólo llega a una superficie cuando se encuentra situada en dirección perpendicular a la dirección de la radiación. Esta radiación sería la máxima que llegaría a la superficie de la Tierra, si no fuera debilitada por la presencia de la atmósfera y por el horizonte (Figura 2.2).

La suma de la potencia solar que incide sobre una superficie, que forma un ángulo h con la dirección de la radiación, hay que calcularla teniendo en cuenta que este ángulo h cambia a lo largo del día. Por lo tanto, la suma de la potencia por día que incide sobre esa superficie situada fuera de la atmósfera se calcula como la suma de todos los valores producidos a lo largo del día, así:

$$\bar{G}_0(n) = G_0(n) \int_{\text{día}} \text{sen } h(t) dt \tag{2.6}$$

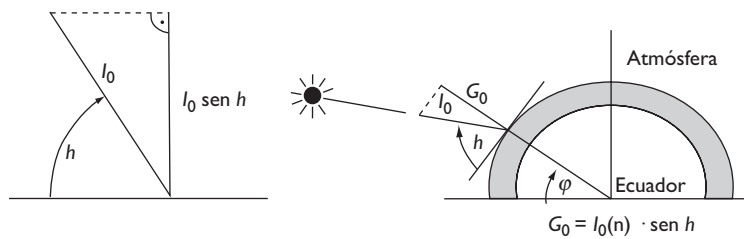


Figura 2.2 Potencia de la radiación solar G_0 fuera de la atmósfera terrestre que incide sobre una superficie que forma un ángulo h con ella.

donde n representa el número de orden del día en el año. La suma a lo largo del mes, $\bar{G}_0(m)$, se hace sumando los valores individuales de cada día del mes:

$$\bar{G}_0(m) = \sum_{\text{día del mes}} \bar{G}_0(n) \quad (2.7)$$

La suma a lo largo de todo el año se puede calcular de forma análoga. En Europa, las sumas diarias de la radiación extraterrestre varían entre 2,5 y 11,5 kWh m⁻² día⁻¹, y entre 80 y 340 kWh m⁻² mes⁻¹. La suma anual viene a ser de unos 2600 kWh m⁻² año⁻¹.

También tienen influencia sobre la irradiancia las variaciones que se producen en la emisión de energía por el Sol.

De esta radiación incidente, alrededor de un tercio es reflejada de nuevo al espacio. El resto de la radiación es absorbido, dando lugar a los diferentes procesos que aportan energía a la biosfera, hasta degradarse a radiación de longitud de onda larga, infrarroja, que termina por ser reemitida al espacio. Esta reemisión, por parte de la Tierra, de tanta energía como recibe, permite mantener un equilibrio energético y una temperatura media constante de 15 °C en la biosfera, que es compatible con las formas de vida que conocemos.

Absorción y dispersión de la luz por la atmósfera

La energía producida en el Sol se transmite por el espacio en forma de *ondas electromagnéticas*, que se desplazan a una velocidad $c = 300\,000$ km s⁻¹. Tardan, por lo tanto, 500 segundos (8 minutos y 20 segundos) en cubrir los 150 millones de kilómetros de distancia que existen entre el Sol y la Tierra. Este tipo de ondas no precisan de un medio material para propagarse. Las ondas electromagnéticas que llegan a la Tierra procedentes del Sol tienen longitudes de onda comprendidas entre unos 250 y 6000 nm (entre 0,25 y 6 μm), de las cuales la radiación visible corresponde al intervalo comprendido entre 380 y 780 nm. El conjunto de estas radiaciones forman el denominado *espectro solar*, que es una distribución de la densidad de potencia relativa (en W m⁻² por unidad de intervalo de longitud de onda) frente a longitud de onda.

La radiación electromagnética procedente del Sol interacciona con las moléculas de los gases componentes de la atmósfera, dando lugar a *la absorción y la conversión de energía radiante en calor*, que es reemitido al espacio en forma de radiación de onda larga. También se producen *dispersión*, que es un cambio de dirección de la radiación, que depende de la longitud de onda, y *reflexión*, que no depende de la longitud de onda. Una parte de la luz dispersada llega a la superficie de la Tierra como radiación difusa. Como la difusión de la luz por las moléculas de los gases componentes del aire, de acuerdo con la ecuación de Rayleigh, es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de

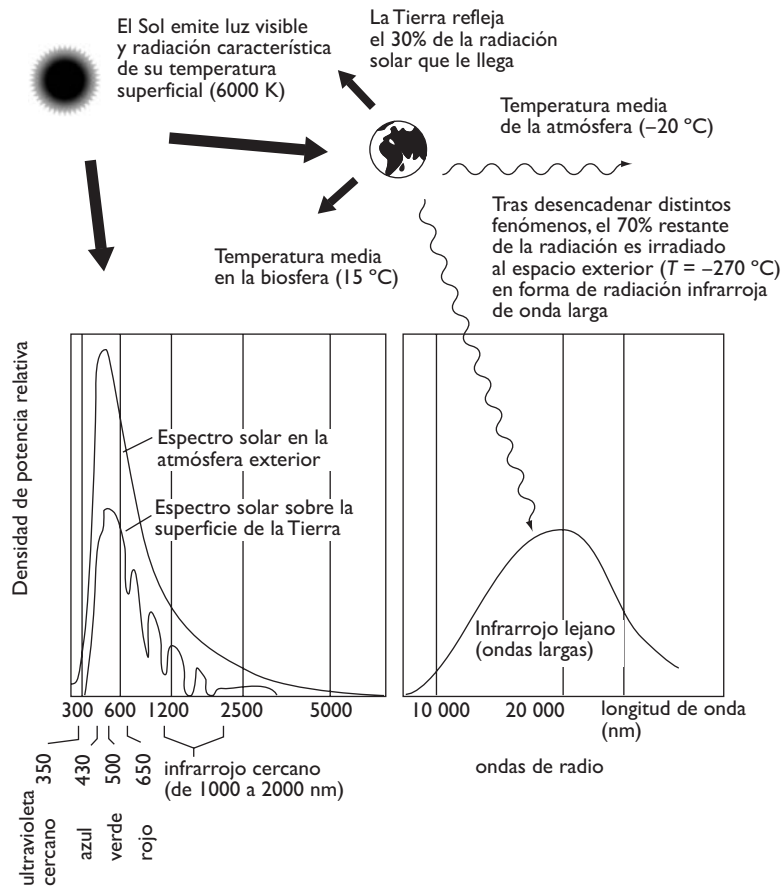


Figura 2.3 Radiación solar incidente sobre la Tierra. Distribución espectral en la atmósfera exterior y sobre la superficie de la Tierra. A la derecha se presenta el espectro de radiación característica de la Tierra a la temperatura media de 15 °C. Este espectro está formado por radiaciones de onda larga pertenecientes al infrarrojo lejano, que son reemitidas al espacio exterior. Esta energía radiante, degradada en forma de radiaciones de baja energía, es la misma que había sido absorbida (70% de la radiación incidente) en forma de radiaciones de mayor energía (es decir, de longitudes de onda más corta).

haberse producido la absorción de parte de la radiación, por los gases componentes de la atmósfera.

Reflexión de la luz solar y efecto invernadero

Por término medio, de la intensidad solar extraterrestre que le llega, la Tierra refleja de nuevo al espacio alrededor del 30%. De este proceso son responsables fundamentales las nubes, aunque la superficie de la Tierra participa también en pequeña proporción, sobre todo en aquellas partes que están recubiertas de nieve y hielo. La radiación solar de onda corta llega con una

una buena noción de las cantidades de radiación solar que inciden sobre un país o un continente durante una determinada época del año.

Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran mapas con líneas de igual insolación medidas para Europa Occidental en un determinado día de julio y de enero, respectivamente,

El valor de la insolación diaria, H , cambia cada día del año debido a los movimientos de rotación y traslación de la Tierra alrededor del Sol. La Figura 2.6 muestra una representación de la rotación de la Tierra alrededor de un eje que pasa por los polos. Este eje es perpendicular plano ecuatorial. La posición de cualquier punto P sobre la superficie de la Tierra se determina por medio de las dos coordenadas esféricas angulares que, en el caso de la esfera terrestre, se denominan *longitud y latitud*. La tercera coordenada, en el caso de la Tierra, sería la altura en el punto considerado. Al ángulo ϕ que forma la recta que une el centro de la Tierra

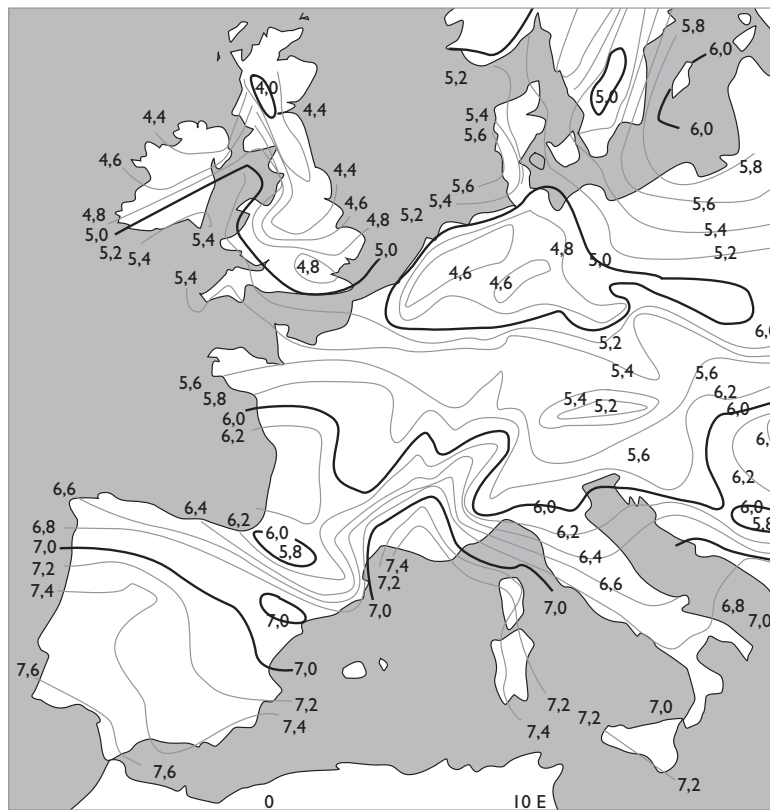


Figura 2.4 Mapa de la radiación solar sobre una superficie horizontal en Europa Occidental y en un día de julio (las cifras indican kWh/m² día).

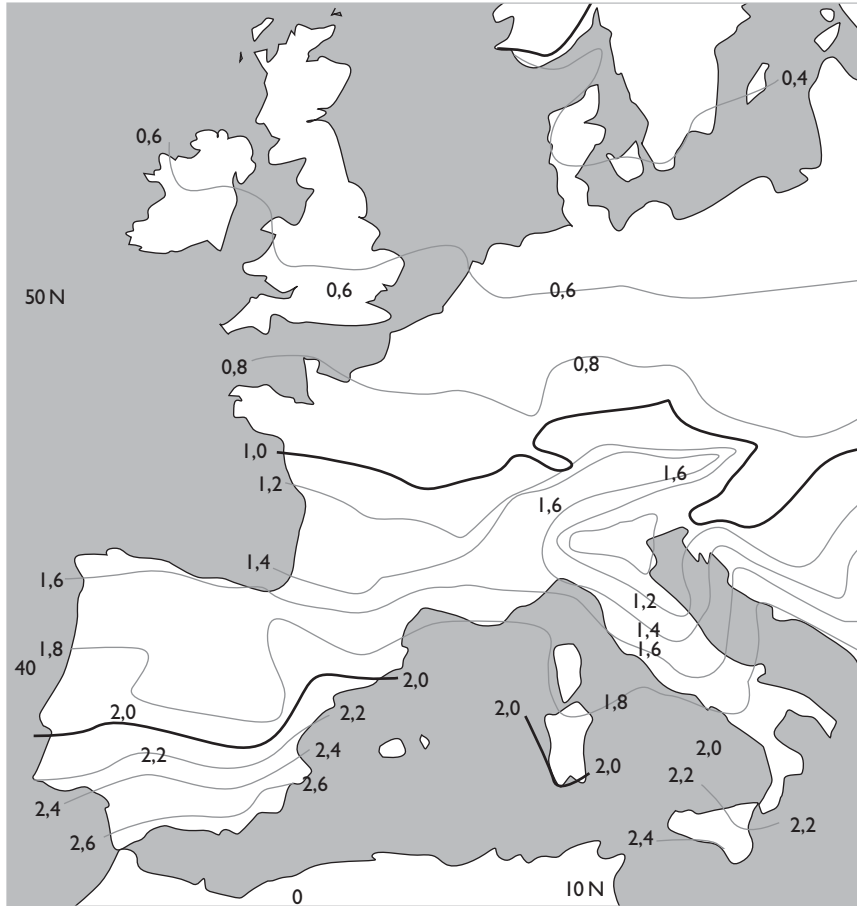


Figura 2.5 Mapa de radiación solar sobre una superficie horizontal en Europa Occidental en un día de enero (las cifras indican kWh/(m² día).

con P con el plano ecuatorial se le denomina *ángulo de latitud*. Por lo tanto, el ecuador tiene una latitud de 0° y los polos de 90°.

Hay una circunferencia que incluye los polos y el punto P. Esta circunferencia es el meridiano en que se encuentra P. La recta CE que une al centro de la Tierra C con el punto E, donde el meridiano de P corta al ecuador, forma un ángulo ψ , denominado *ángulo de longitud*, con la recta CG, que une el centro de la Tierra con G, que es el punto en que el meridiano de una localidad inglesa (Greenwich) que se ha tomado como referencia, corta al ecuador. Con la longitud Este u Oeste y la latitud Norte o Sur se determina la posición de cualquier punto sobre la superficie de la Tierra. El eje de rotación de la Tierra forma un ángulo δ_0 , de 23,5° con la vertical al plano de la eclíptica, como puede verse en

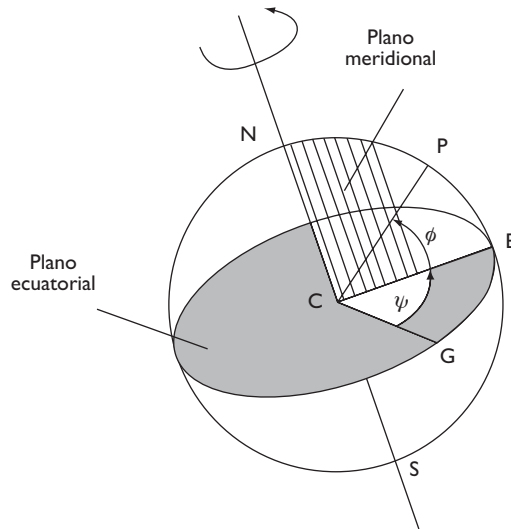


Figura 2.6 Diagrama definitorio de las coordenadas esféricas, latitud, ϕ , y longitud, ψ .

las Figuras 2.7 y 2.8. Esto hace que en el hemisferio Norte los días se acorten desde el 21 de junio al 21 de diciembre, y, en general, sean más cortos en invierno que en verano, y que el fenómeno se acentúe a medida que aumenta la latitud del punto geográfico considerado.

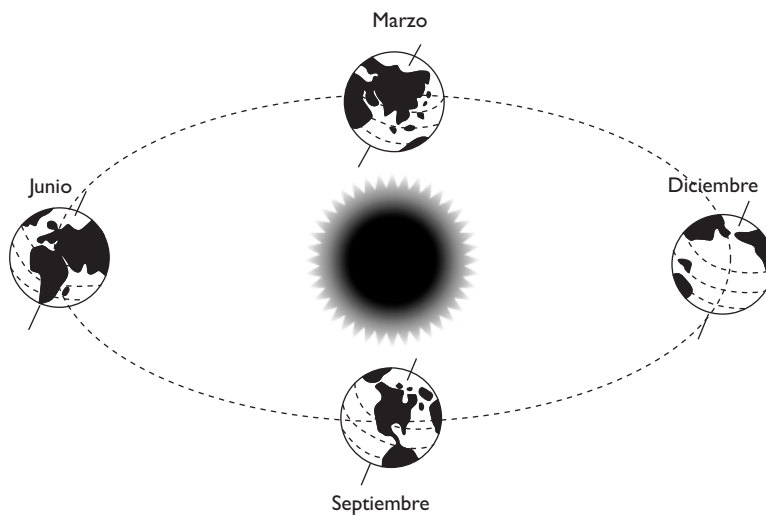


Figura 2.7 La Tierra gira alrededor del Sol con el eje polar formando un ángulo, denominado de declinación, $\delta_0 = 23^\circ$ y $27'$ con la perpendicular al plano de rotación (también denominado plano de la eclíptica).

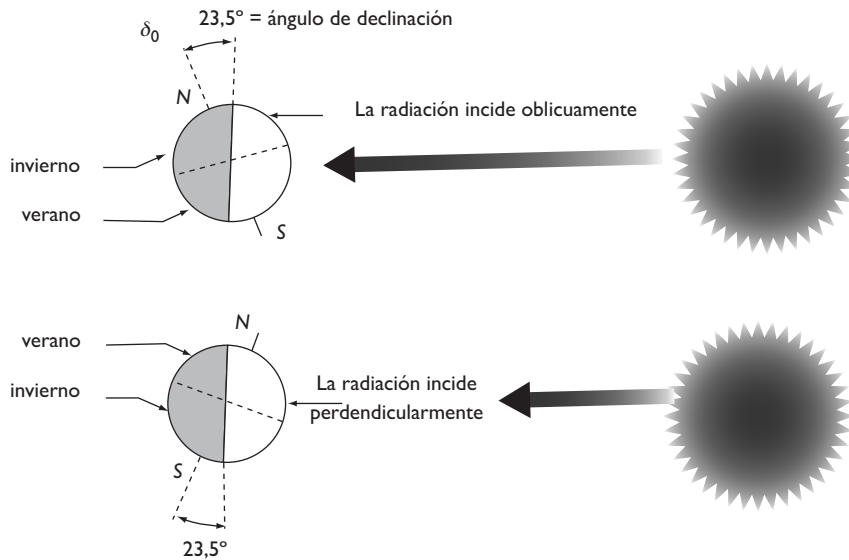


Figura 2.8 El ángulo de declinación, δ_0 , es el causante del desarrollo de las estaciones en los hemisferios Norte y Sur.

Asimismo, la radiación solar incide más verticalmente en esta época en dicho hemisferio Norte. Lo inverso sucede en la misma época en el hemisferio Sur. Desde el 21 de diciembre al 21 de junio, los días aumentan su duración en el hemisferio Norte y disminuyen en el hemisferio Sur. El ángulo que forma la dirección de los rayos solares con el plano ecuatorial se denomina *ángulo de declinación*, y cambia a lo largo de las estaciones. Cuando el Sol se encuentra en línea con los puntos P y C (C = centro de la Tierra), es decir, en P es mediodía, la declinación sería igual a la latitud ($\delta = \phi$). La declinación, δ , varía lentamente entre $+\delta_0 = +23,5^\circ$ en pleno verano en el hemisferio Norte, a $-\delta_0 = -23,5^\circ$ en el mismo punto en pleno invierno. Los valores de δ para cualquier día del año se pueden obtener por medio de la expresión analítica:

$$\delta = \delta_0 \operatorname{sen} \left[360^\circ \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (2.15)$$

donde n representa el número de orden del día del año ($n = 1$, el día 1 de enero o $n = 59$ el día 28 de febrero). Por lo tanto, para el día 21 de marzo, $n = 80$, y, en consecuencia:

$$\begin{aligned} \delta_{21 \text{ de marzo}} &= 23,5^\circ \operatorname{sen} \left[360^\circ \frac{(284 + 80)}{365} \right] = 23,5^\circ \operatorname{sen} |359^\circ| = 23,5^\circ \times (-0,017) \\ &= -0,40^\circ \end{aligned}$$

Para el 21 de junio, $n = 172$ y $\delta_{21 \text{ de junio}} = +23,5^\circ$, y para el 21 de diciembre $n = 355$ y $\delta = -23,5^\circ$.

La *variación de la duración del día* viene dada por la ecuación:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \tag{2.16}$$

Para la latitud de Madrid ($\phi \approx 40^\circ \text{ N}$), el día 1 de septiembre se tendría $n = 244$, $\delta = 7,74^\circ$ y $N = (2/15) \cos^{-1}(-\tan 40^\circ \times \tan 7,71^\circ) = (2/15) \cos^{-1}(-0,84 \times 0,135) = (2/15) \times 96,53 = 12,87 \text{ horas} = 12 \text{ horas } 52 \text{ minutos } 12 \text{ segundos}$. En los polos el producto $|\tan \phi \tan \delta|$ puede llegar a ser mayor que 1, ya que $|\phi| > 66,5^\circ$ y $N = 24$ horas en verano y 0 horas en invierno.

La insolación recibida depende también de la *inclinación* que presente la superficie receptora de la radiación con respecto a la horizontal. En verano, los rayos inciden más perpendicularmente con respecto a una superficie horizontal, por lo que la radiación recibida será mayor cuanto más se aproxime el ángulo de latitud al de declinación. En el invierno en latitudes templadas, los rayos solares inciden más sesgadamente, por lo que la superficie receptora se encontrará mejor orientada en esta época del año en posiciones próximas a la vertical. Si una superficie se encuentra inclinada un ángulo igual a la latitud, se encontrará en dirección perpendicular a los rayos solares a mediodía en los meses de marzo y septiembre, como se ve en la Figura 2.9.

Si se quiere conseguir que llegue más radiación en invierno, el ángulo de inclinación de la superficie deberá ser algo mayor que la latitud, mientras que la radiación recibida es mayor en verano si el ángulo de inclinación es menor que la latitud, como se ve en la Figura 2.10.

La Figura 2.11 muestra cómo varía la insolación recibida sobre una superficie horizontal en días despejados, H_h , a lo largo de los meses del año y como función de la latitud.

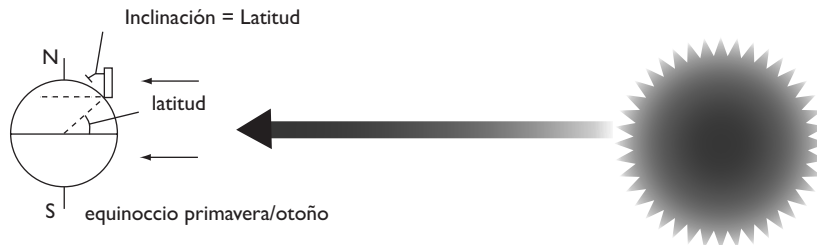


Figura 2.9 En un determinado punto de la Tierra, una superficie inclinada con respecto a la horizontal un ángulo igual a la latitud de ese punto, estará dirigida perpendicularmente a la radiación solar que incide en primavera y otoño.

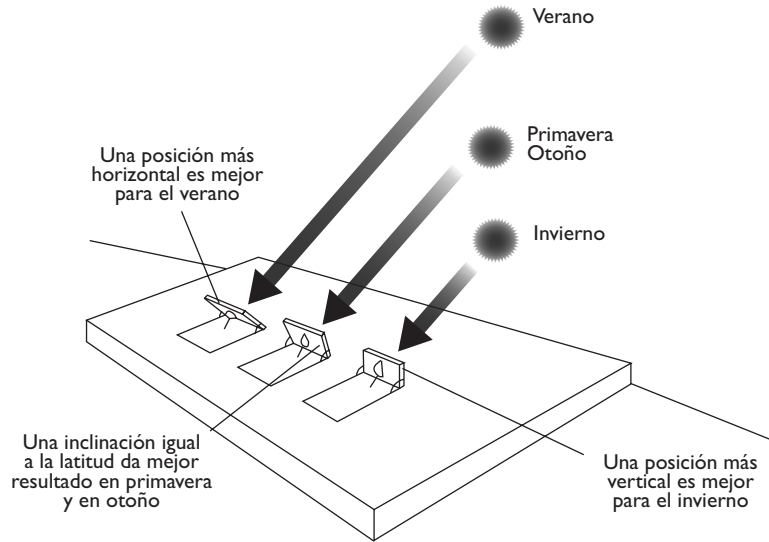


Figura 2.10 Optimización de la inclinación de una superficie a lo largo de las estaciones del año.

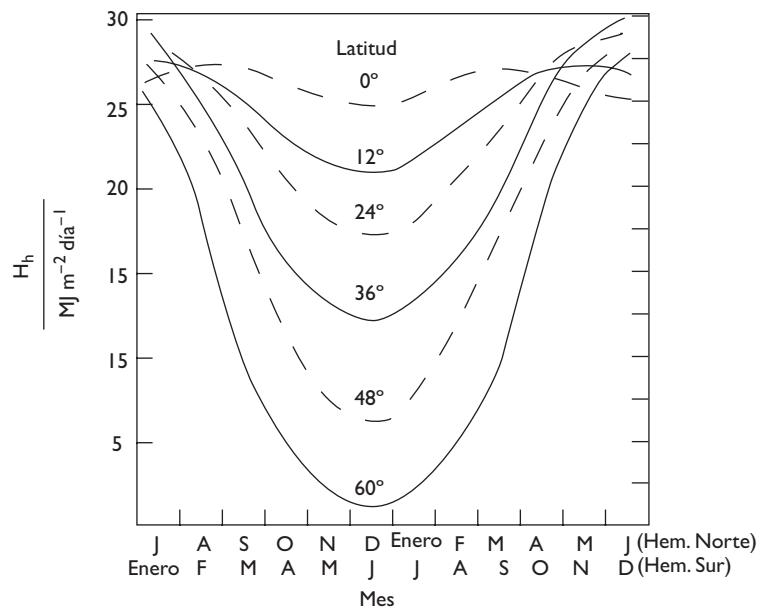


Figura 2.11 Variación de la energía solar recibida sobre una superficie horizontal en un día despejado, H_h , con la estación del año y con la latitud. En el verano, H_h vale alrededor de $25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en todas las latitudes. En el invierno, H_h es mucho menor cuanto mayor es la latitud, debido a que los días son más cortos, la radiación solar incide más oblicuamente y, como consecuencia, se produce una mayor atenuación de su intensidad por la atmósfera.

En verano puede observarse que H_h alcanza un valor de alrededor de $25 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$ cualquiera que sea la latitud. En invierno se ve que la latitud influye mucho en los valores medidos para H_h , ya que, al aumentar la latitud, el día se hace más corto, la luz del sol incide más oblicuamente y tiene que atravesar mayor espesor de atmósfera, lo que causa una mayor atenuación de la radiación debido a la mayor absorción provocada por un espesor más elevado de atmósfera.

En la Figura 2.12 puede verse cómo varía la insolación diaria promedio sobre una superficie con diferentes inclinaciones, en función de la época del año, en un punto situado a una latitud de 45° N .

En cualquier caso, los efectos de la orientación y de la inclinación no son decisivos, como puede verse en la Tabla 2.1 para medidas llevadas a cabo en una localidad situada a 50° N .

De forma análoga, cuando la orientación se aleja del Sur, tampoco se producen efectos particularmente drásticos sobre la insolación diaria o anual recibida sobre la superficie. En el hemisferio Norte un colector de radiación se puede adoptar cualquier orientación que se encuentre comprendida entre el Sudeste y el Sudoeste, sin que la radiación total recibida muestre cambios demasiado importantes. En otras palabras, una gran proporción de edificios y viviendas tienen tejados con una orientación adecuada para montar sobre ellos sistemas de aprovechamiento térmico de la energía solar.

Tabla 2.1 Efecto de la inclinación hacia el Sur de una superficie colectora de radiación sobre la radiación total media recibida en junio y diciembre. Medidas llevadas a cabo en una localidad situada a una latitud de 50° N .

Inclinación	Radiación total anual (kWh m^{-2})	Radiación total en junio (kWh m^{-2})	Radiación total en diciembre (kWh m^{-2})
0° (horizontal)	944	153	16
30°	1068	153	25
45°	1053	143	29
60°	990	126	30
90° (vertical)	745	82	29

Aplicación de las propiedades del vidrio al aprovechamiento térmico de baja temperatura de la energía solar

El vidrio posee la propiedad de ser transparente a la luz visible y al infrarrojo cercano, pero de no dejar pasar la radiación infrarroja lejana, que es reemitida

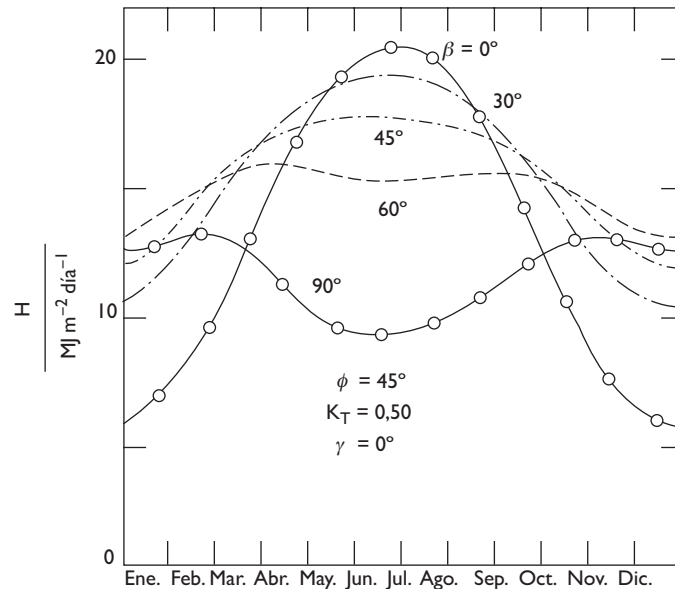


Figura 2.12 Variación de la insolación media estimada, H , sobre una superficie con diferentes ángulos de inclinación como función de la época del año. A una latitud de 45° , con $K_T = H_i/H_{oh}$ (donde H_{oh} es la radiación que se habría recibido en un día sobre una superficie igual a la empleada, y con igual orientación, pero situada más allá de la atmósfera), $\gamma = 0^\circ$ (siendo γ el ángulo que forman el plano vertical a la superficie y los rayos solares) y la reflectancia del suelo es igual a 0,20.

por un colector térmico o por los objetos y paredes de un edificio. El coeficiente de transmisión del vidrio, con respecto a todas las longitudes de onda componentes de la luz visible, es del orden del 85%, mientras que la transmitancia, para longitudes de onda de 3 a 40 μm , apenas si es del 2%. La Figura 2.13 muestra la transmitancia espectral del vidrio.

Por lo tanto, el 98% de la radiación térmica emitida por objetos, paredes, muebles o componentes de un colector solar quedan atrapados por el vidrio, que, además, protege del viento y de la lluvia y permite una iluminación natural durante el día. Para incrementar la eficacia del vidrio en la transmisión de la luz visible se eliminan las impurezas de hierro que pueda tener. También se emplean plásticos con propiedades ópticas similares al vidrio, aunque este tipo de productos sufre degradación por interacción con la radiación ultravioleta.

Con el fin de reducir las pérdidas de calor en edificios o en colectores se recurre a utilizar dobles paredes de vidrio y otros esquemas que se explicarán más adelante.

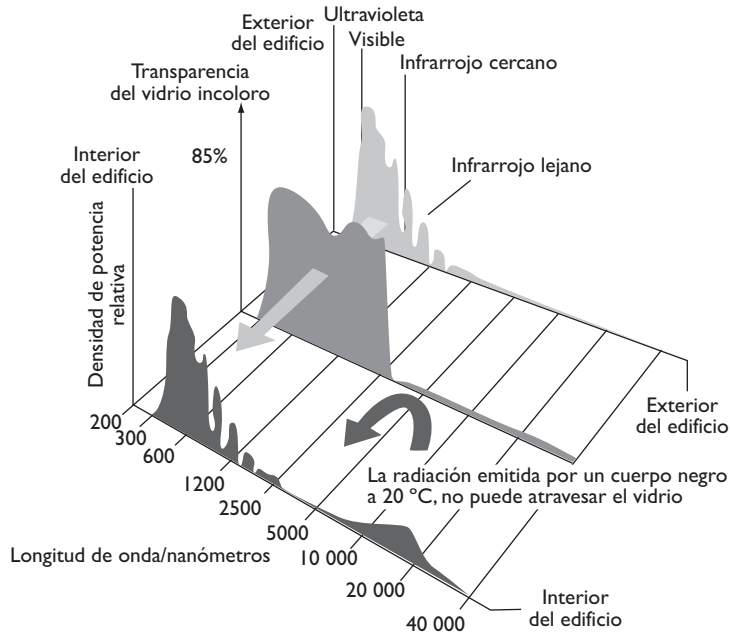


Figura 2.13 Transmitancia espectral del vidrio. Puede observarse que el espectro de la radiación solar visible en el exterior del edificio se conserva prácticamente igual en el interior, puesto que la transmitancia que muestra el vidrio en la región del visible y del infrarrojo cercano es del 85%, aproximadamente. Por lo tanto, estas radiaciones atraviesan el vidrio sin ser apenas absorbidas. Sin embargo, la transmitancia cae abruptamente desde unos 2500 nm hacia longitudes de onda más largas, hasta un valor del 2%. A la derecha, en la parte inferior, aparece el espectro de radiación de un cuerpo negro a unos 20 °C, que es la temperatura interior del edificio. Se ve que todas las radiaciones pertenecen al infrarrojo lejano. Las radiaciones de onda corta del visible y del infrarrojo cercano son absorbidas por los objetos que se encuentran en el interior y reemitidas en forma de radiaciones de onda más larga. El vidrio presenta, para estas radiaciones térmicas, una transmitancia de apenas el 2%, por lo que quedan atrapadas en el interior, contribuyendo a conservar el calor del mismo.

2.3 Mecanismos de pérdida de calor

El calor se transfiere de un punto a otro del espacio por *conducción, convección y radiación*.

Por *conducción térmica* se entiende un mecanismo de transferencia de calor debido a las vibraciones de moléculas, átomos o electrones, en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que se produzca un desplazamiento neto en conjunto. Este mecanismo de transferencia de calor se produce esencialmente en sólidos. En líquidos y gases puede darse también, aunque en ellos el mecanismo predominante es la convección, mediante la cual el fluido se mueve en conjunto.

El flujo de calor, P , medido en $\text{J/s} = \text{W}$, que se produce a través de una pared de espesor Δx es proporcional al área A , a través de la que se pro-

Tabla 2.2 Densidad y conductividad de algunos sólidos a temperatura ambiente.

Material	Densidad $\rho/\text{kg m}^{-3}$	Conductividad térmica k $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Aire quieto (a 27 °C y 1 atmósfera)	1,18	0,026
Acero	7850	47,6
Aluminio	2675	211
Cobre	8795	385
Cemento	2400	1,73
Corcho	144	0,042
Ladrillos	2300	0,6
Hielo	918	2,26
Madera de pino	570	0,138
Madera de roble	770	0,16
Espuma de poliuretano	24	0,025
Poliestireno expandido	16	0,035
Vidrio	2515	1,05
Yeso seco	881	0,17

global de una ventana, debido a la contribución que hace a la resistencia total la convección del aire en la capa próxima al vidrio, y a que las dos resistencias se suman en paralelo.

La resistencia a la conducción térmica de 1 m^2 de una pared de ladrillo de 25 cm de espesor sería:

$$R_c = \frac{0,25 \text{ m}}{(0,6 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1})(1 \text{ m}^2)} = 0,42 \text{ W}^{-1} \text{K} ; r = R_c A (1 \text{ m}^2) = 0,42 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{K}$$

con un valor de $U_c = 1/r = 2,38 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$

Otra propiedad relacionada con la conductividad es la *difusividad térmica*, κ . Esta magnitud da cuenta de la rapidez con que se difunden a través de un material cambios de temperatura, y es el cociente entre la conductividad térmica y el producto de la densidad, ρ , y el calor específico a presión constante, c , del material, es decir:

$$\kappa (\text{m}^2 \text{s}^{-1}) = \frac{k (\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1})}{\rho (\text{kg m}^{-3}) c (\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})} \quad (2.21)$$

ferencia de calor por unidad de área, q , que se produce por conducción a través de la capa estacionaria de fluido de espesor δ viene dada por

$$q = \frac{P}{A} = k \frac{(T_s - T_f)}{\delta} \quad (2.23)$$

donde k es la conductividad térmica del fluido.

La idea de capa límite térmica es un concepto idealizado y su espesor no es mensurable. Lo que se hace es medir una dimensión característica, X , que se define de forma arbitraria para cada tipo de superficie concreta. Esta dimensión se introduce en la Ecuación 2.23, multiplicando y dividiendo por ella el segundo miembro:

$$q = \frac{P}{A} = k \frac{(T_s - T_f)}{\delta} = \frac{X}{\delta} \frac{k (T_s - T_f)}{X} = \aleph \frac{k (T_s - T_f)}{X} \quad (2.24)$$

donde

$$\aleph = \frac{X}{\delta} \quad (2.25)$$

es una magnitud adimensional, *un factor de escala*, al que se denomina *número de Nusselt*, y que se usa para cualquier cuerpo que tenga una forma equivalente y que se encuentre con flujos de fluido análogos. Teniendo en cuenta la Ecuación 2.18, se puede definir la *resistencia a la convección*, R_v , de la forma siguiente:

$$R_v = \frac{\delta}{k A} \quad (2.26)$$

y, a partir de la Ecuación 2.25, se deduce que $\delta = X/\aleph$, sustituyendo la cual en la Ecuación 2.26, se llega a la siguiente ecuación para la *resistencia térmica a la convección*:

$$R_v = \frac{X}{k A} \aleph^{-1} \quad (2.27)$$

y la ecuación para la *resistividad térmica convectiva por unidad de área*:

$$r_v = R_v A = X/\aleph k \quad (2.28)$$

y para el *coeficiente de transferencia convectiva de calor*:

$$h_v = \frac{1}{r_v} = \aleph \frac{k}{X} \quad (2.29)$$

La Ecuación 2.24 se puede expresar ahora en la forma:

$$q = h_v (T_s - T_f) \quad (2.30)$$

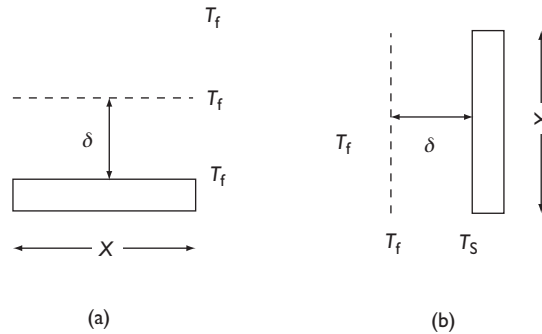


Figura 2.14 Capa límite térmica ideal en convección natural: (a) Superficie caliente horizontal. (b) Superficie caliente vertical.

El calor total transferido por convección depende de las propiedades del fluido, de la velocidad de flujo del mismo y de la forma y tamaño de la superficie. *El número de Nusselt es una medida adimensional del calor transferido.* En condiciones ambientales normales, h_v en el interior de un edificio puede alcanzar un valor de unos $3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, mientras que en el exterior, si el viento es intenso, puede llegar a valer $200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. En la mayor parte de las superficies se puede hacer una estimación del valor de h_v utilizando la ecuación: $h_v = 5,7 (\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}) + 3,8 (\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}) u$, donde u es la velocidad del viento en m s^{-1} . La Figura 2.15 muestra cómo las pérdidas térmicas en un *colector* dependen de la diferencia de temperatura entre el colector y su entorno y de la velocidad del viento.

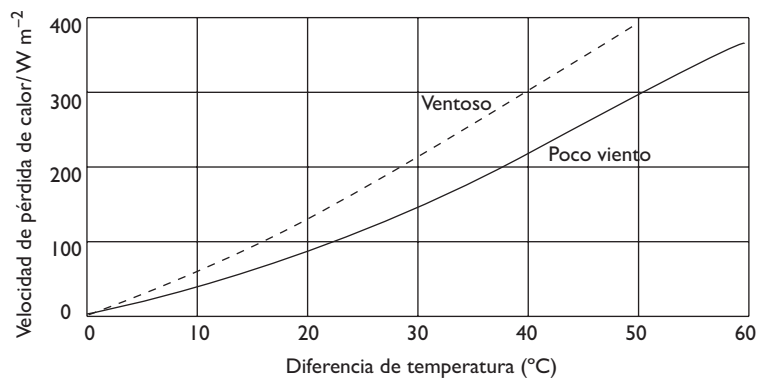


Figura 2.15 Pérdidas de calor en un colector. Las curvas indican cómo las pérdidas de calor de un colector dependen de la diferencia de temperatura entre el colector y su entorno y de la velocidad del viento.

Transporte de energía por radiación

La energía es transportada en el espacio vacío o en un medio transparente por propagación de ondas electromagnéticas o *radiación*. Al flujo de energía por unidad de área se le denomina *densidad de flujo radiante*, y se le designa por ϕ , en W m^{-2} . La potencia por unidad de superficie que emite un radiador perfecto viene dada por la ley de Stefan–Boltzmann:

$$\phi = \sigma T^4 \quad (2.34)$$

donde T viene expresada en K, y $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, es la constante de Stefan.

Si se tiene un cuerpo emisor ideal a temperatura T_2 , rodeado por una superficie a temperatura T_1 , el flujo radiante por unidad de superficie viene dado por

$$\phi = \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.35)$$

El flujo de radiación emitido a cualquier temperatura por un cuerpo real es inferior al irradiado por un emisor ideal. Un cuerpo gris es a aquel que emite una fracción constante de la radiación que emitiría un cuerpo negro a cada longitud de onda a la misma temperatura. Se define así la *emitancia* ε de la superficie del cuerpo gris como el cociente entre su potencia emisiva y la que mostraría un cuerpo negro a la misma temperatura. Suponiendo que un cuerpo negro a temperatura T_2 rodea a un cuerpo gris a temperatura T_1 , el flujo radiante por unidad de superficie valdría

$$\phi = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.36)$$

Si ninguno de los dos cuerpos son radiadores ideales y entre ambos existe una relación geométrica definida, la ecuación del flujo radiante adopta la forma

$$\phi = \sigma F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.37)$$

donde F_{1-2} es un coeficiente, el *factor de intercambio*, que modifica la ecuación del radiador ideal dependiendo de la relación entre las formas geométricas, la relación entre las áreas y las propiedades emisivas de ambas superficies, a través de los valores ε_1 y ε_2 de las emisividades.

La Ecuación 2.37 se puede expresar adoptando una formulación en función de la resistencia térmica a la radiación. Para ello se puede factorizar el paréntesis en la forma:

$$(T_1^4 - T_2^4) = (T_1^2 + T_2^2) (T_1^2 - T_2^2) = (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) (T_1 - T_2)$$

$$\phi = \sigma F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) = \sigma F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) (T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{r_r} \quad (2.38)$$

con r_r = resistividad por unidad de área a la transferencia por radiación:

$$r_r = \frac{1}{\sigma F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2)} \quad (2.39)$$

Y, en el caso de que $(T_1 - T_2) \ll T_1, T_2$, entonces, con

$$\bar{T} = (T_1 + T_2)/2, (T_1 + T_2) = 2 \bar{T}; (T_1^2 - T_2^2) = 4 \bar{T}^2 - 2 T_1 T_2$$

se obtiene:

$$(T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) = (4 \bar{T}^2 - 2 T_1 T_2) 2 \bar{T}$$

y, como $T_1 \approx T_2 \approx \bar{T}$, se tiene:

$$(T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \approx 8 \bar{T}^3 - 4 \bar{T}^3 = 4 \bar{T}^3$$

y, finalmente:

$$r_r \approx (4 \sigma F_{1-2} \bar{T}^3)^{-1} \quad (2.40)$$

o bien:

$$h_r = r_r^{-1} = 4 \sigma F_{1-2} \bar{T}^3 \quad (2.41)$$

y

$$\phi = h_r (T_1 - T_2) \quad (2.42)$$

siendo h_r la conductividad térmica a la radiación.

El ejemplo siguiente muestra cómo se utilizan las ecuaciones anteriores para calcular flujos térmicos de radiación.

Ejemplo

El factor de intercambio, o factor de forma para dos superficies paralelas infinitas, se encuentra tabulado y vale $F_{1-2} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$. Calcúlese el valor de la resistividad a la radiación por unidad de área, r_r , el valor de la resistencia, R_r , y el flujo térmico que se produce entre dos placas de 2 m^2 de área con emitancias 0,8 y 0,3 y a temperaturas $T_1 = 400 \text{ K}$ y $T_2 = 350 \text{ K}$.

Respuesta

Con $\bar{T} = \frac{1}{2}(400 + 350) = 375$ K, la resistividad térmica de radiación es

$$r_r \approx (4 \sigma F_{1-2} \bar{T}^3)^{-1} = \frac{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}{4 \sigma \bar{T}^3} =$$

$$= \frac{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,3} - 1}{4 (5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}) \times 375^3 \text{ K}^3} = 0,3 \text{ K m}^2$$

La resistencia térmica, R_r , vendría dada por

$$R_r = r_r/A = 0,3 \text{ K m}^2 \text{ W}^{-1}/2 \text{ m}^2 = 0,15 \text{ K W}^{-1}$$

Flujo térmico = $P = \phi \times A = (T_1 - T_2)/R_r = 50 \text{ K}/0,15 \text{ K W}^{-1} = 333 \text{ W}$

Combinación de conducción, convección y radiación

Supóngase un vidrio de ventana de espesor $(\Delta x)_{vi}$ y conductividad k_{vi} , que recibe energía radiante desde el exterior, más energía térmica por convección del aire en contacto. La capa de aire exterior se encuentra a temperatura T_{ex} y se produce un flujo de calor por convección y radiación a través de las resistencias en paralelo R_r y R_c . Si las temperaturas de las superficies interna y exterior del vidrio son T_1 y T_2 y el único mecanismo de transporte de calor en el interior se produce por convección a través de una resistencia $R_{v\ in}$, el flujo térmico total desde el exterior a la superficie externa del vidrio sería:

$$q_{ex} = \frac{P}{A} = \frac{(T_{ex} - T_1)}{r_c} + \frac{(T_{ex} - T_1)}{r_r} = \frac{(T_{ex} - T_1)}{r_{ex}} \quad (2.43)$$

donde

$$\frac{1}{r_{ex}} = \frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_r} \quad (2.44)$$

El flujo por conducción a través del vidrio vendría dado por

$$q_{vi} = \frac{P}{A} = \frac{k_{vi}}{(\Delta x)_{vi}} (T_1 - T_2) = \frac{(T_1 - T_2)}{r_{vi}} = b_{vi} (T_1 - T_2) \quad (2.45)$$

con

$$r_{vi} = (\Delta x)_{vi} / k_{vi} = 1/b_{vi} \quad (2.46)$$

y, finalmente, el flujo por convección en el interior sería:

$$q_{\text{in}} = \frac{(T_2 - T_{\text{in}})}{r_{\text{v,in}}} = h_{\text{v,in}} (T_2 - T_{\text{in}}) \quad (2.47)$$

En régimen estacionario se cumple: $q = q_{\text{in}} = q_{\text{vi}} = q_{\text{ex}}$. Además: $q_{\text{ex}} r_{\text{ex}} + q_{\text{vi}} r_{\text{vi}} + q_{\text{in}} r_{\text{v,in}} = (T_{\text{ex}} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_{\text{in}}) = (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) = q (r_{\text{vi}} + r_{\text{ex}} + r_{\text{v,in}})$, y, finalmente:

$$q = \frac{(T_{\text{ex}} - T_{\text{in}})}{r_{\text{ex}} + r_{\text{c,vi}} + r_{\text{v,in}}} = U (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) \quad (2.48)$$

donde

$$U = \frac{1}{r_{\text{ex}} + r_{\text{c,vi}} + r_{\text{v,in}}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{ex}}} + \frac{1}{h_{\text{c,vi}}} + \frac{1}{h_{\text{v,in}}}} \quad (2.49)$$

representa el *coeficiente global de transferencia de calor*, cuyas unidades en el SI son $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, es decir, representa la *potencia térmica transferida por unidad de superficie, y por grado de diferencia de temperatura entre el exterior y el interior*.

La pérdida global de calor que tiene lugar a través de las paredes de un *colector* o de cualquier *elemento de construcción de un edificio*, puede provenir de la combinación de los tres mecanismos de transferencia de calor y suele denominarse *valor U* del elemento. En la Tabla 2.3 se dan algunos valores de *U* para diferentes tipos de ventanas.

Tabla 2.3 Valor U para diferentes tipos de ventana.	
Tipo de ventana	Valor U ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$)
Ventana con un solo vidrio	6
Ventana de doble vidrio (5 cm de espacio entre vidrios)	3
La ventana anterior con vidrios con recubrimientos de baja ϵ	1,8
Ventana anterior con relleno de gas pesado	1,5
Ventana anterior con 3 películas de plástico con recubrimientos de baja ϵ y relleno de espacio entre vidrios con gas pesado	0,35
Espesor de 10 cm con aislamiento de fibra de vidrio	0,4
Vidrio	2515
Yeso seco	881

La Figura 2.16 muestra cómo varía la pérdida de calor global que se produce a través de una ventana con doble vidrio, que contiene aire en el espacio entre vidrios, como función de la separación entre vidrios y con la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior como parámetro. La pérdida mínima de calor se produce para una anchura de entre 15 y 20 mm. A mayor anchura disminuyen las pérdidas por conducción (a través de un medio mal conductor como es el aire), pero, al disminuir la resistencia a las corrientes convectivas, las pérdidas por circulación o convección del aire compensan el mayor aislamiento para la conducción que se logra con un mayor espesor de aire.

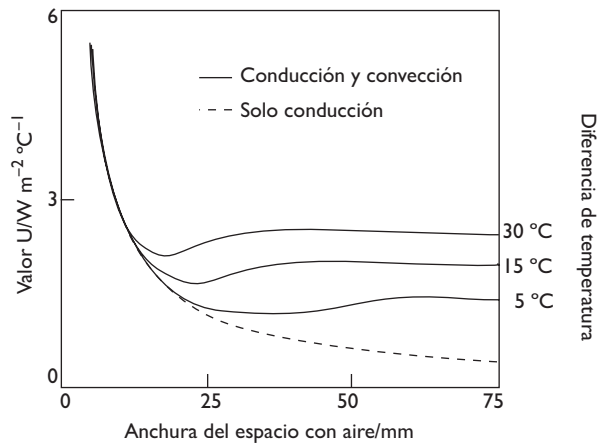


Figura 2.16 Variación de las pérdidas de calor a través de una ventana de doble vidrio con la anchura del espacio con aire. La pérdida mínima de calor se produce para un espesor de alrededor de 15-20 mm.

Pérdida de calor en edificios: Grados-día

Las pérdidas de calor que se producen en un edificio a través de sus paredes, ventanas, tejados y otros elementos son proporcionales a la media de la diferencia de temperaturas entre el aire en el interior y el aire en el exterior e inversamente proporcionales a las resistividades térmicas de los materiales que componen los elementos de edificación multiplicadas por las superficies de ventanas, tejados, etc. Para calcular las pérdidas de calor a través de cada superficie se multiplica el coeficiente global de transferencia de calor, \bar{U} , por el área de la misma, A . Las pérdidas de calor del edificio a través de sus superficies exteriores serían entonces: $P (W) = \bar{U} A (T_i - T_{ex})$. De este modo se podría calcular el gasto energético necesario para la calefacción del edificio. Para ello se introduce el concepto de *grados-día*. Si, por ejemplo, la temperatura media en el interior a lo largo del día es de 18 °C y la del exterior

8 °C, entonces la diferencia media sería 10 °C. A ese día se le asignarían 10 grados-día. Si otro día la temperatura interna media sigue siendo 18 °C y la temperatura media exterior fuese de -7 °C, entonces la diferencia media sería de 25 °C, a ese día se le asignarían 25 grados-día y las pérdidas de calor a través de todos los elementos componentes del edificio serían dos veces y media mayores que las sufridas en un día con 10 grados-día.

En el caso de que un día determinado la temperatura externa fuera mayor que la interior, no habría necesidad de utilizar calefacción y a ese día se le asignarían 0 grados-día, en vez de una cantidad negativa. La temperatura media diaria suele calcularse como la media aritmética entre la temperatura máxima y la mínima.

El calor total perdido por el edificio a lo largo del año se obtiene sumando los grados día de todos los días a lo largo del año y multiplicando esa cantidad por $\bar{U}A$ (donde se supone que el coeficiente global de pérdida de calor, \bar{U} , es independiente del día). Es decir:

$$Q_T = \bar{U}A \sum_{i=1}^{i=365} (\bar{T}_i - \bar{T}_{ex}) = \bar{U}A \times \text{GD}; \quad (2.50)$$

con

$$\text{GD} = \sum_{i=1}^{i=365} (\bar{T}_i - \bar{T}_{ex}) \quad (2.51)$$

Como $\bar{U}A$ viene expresado en $\text{W } ^\circ\text{C}^{-1} = \text{J s}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$ y GD viene dado en $^\circ\text{C día}$, para obtener las pérdidas energéticas en julios hay que multiplicar por $86\,400 \text{ s día}^{-1}$. Es decir:

$$Q_T (\text{J}) = \bar{U}A (\text{J s}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}) \sum_{i=1}^{i=365} (\bar{T}_i - \bar{T}_{ex}) (^\circ\text{C día}) \times 86\,400 (\text{s día}^{-1}) \quad (2.52)$$

El uso del concepto de *grados-día* se ha generalizado para hacer estimaciones de las necesidades energéticas de los edificios, por lo que suelen publicarse con regularidad tablas de grados-día para cada mes y para diferentes localidades.

2.4 Colectores solares

Una de las formas más sencillas de utilizar la energía solar es en aplicaciones en las que no es necesario alcanzar temperaturas elevadas, como calentar aire y agua para calefacción y agua para usos domésticos. Este tipo de dispositivos, *que no forman parte del edificio al que se adosan*, se denominan de *calefacción solar*

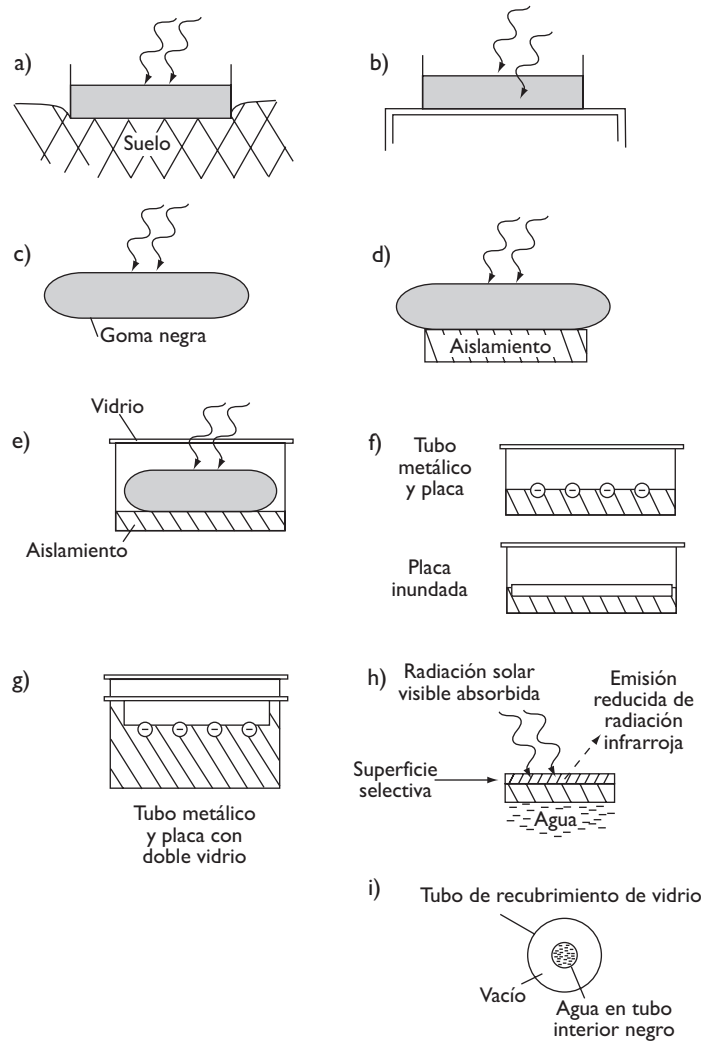


Figura 2.17 Secuencia de colectores solares ordenados por orden creciente de eficiencia y coste.

selectiva (caso (h) en la Figura 2.17) cuya absorbanza para radiaciones de onda corta sea mucho mayor que su emisividad para longitudes de onda larga, es decir, $\epsilon_{\text{larga}} \ll \alpha_{\text{corta}}$. De este modo se reducen las pérdidas de calor por radiación. Una modificación que reduce aún más las pérdidas de calor, pero que encarece el colector, es utilizar un **colector evacuado**, donde el agua circula por un tubo, de pared interna negra, y que está dentro de otro tubo de vidrio. En el espacio entre ambos tubos se hace el vacío y de este modo se reducen las pérdidas de calor por convección hacia la cubierta. En la Figura 2.18 se representan algunos modelos de colectores de placa plana.

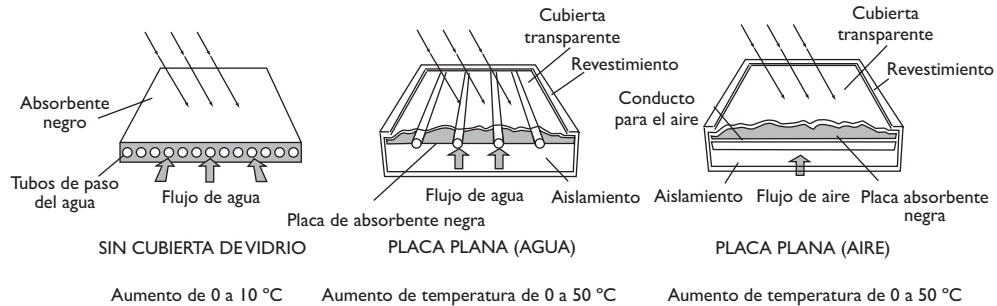


Figura 2.18 Algunos modelos de colectores de placa plana junto con los aumentos de temperatura a que pueden dar lugar.

Cálculo del balance de calor en un colector de placa plana

Los colectores de placa metálica y tubos consisten en una placa de metal ennegrecida a la que se encuentran adosados una serie de tubos dispuestos paralelamente, a través de los cuales circula agua. Todo ello lleva un aislamiento térmico en los costados y en la parte posterior, y va cubierto con una placa de vidrio que actúa como protección delantera. La Figura 2.19 muestra un esquema de un colector de placa.

La resistencia térmica entre la placa y los tubos y en el espacio existente entre los tubos tiene que ser lo menor posible. Los tubos pueden tener un diámetro de unos 2 cm y estar separados 20 cm entre sí. El espesor de la placa puede ser de unos 0,3 cm. Placa y tubos van en el interior de una caja recubierta de vidrio.

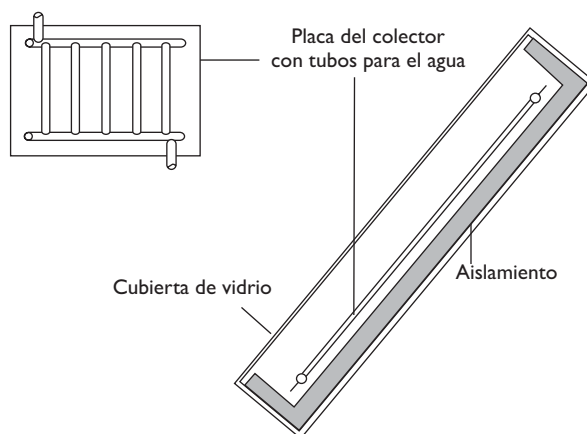


Figura 2.19 Colector de placa plana.

La Figura 2.20 muestra un esquema de colector solar. El componente principal del colector es la placa, la cual está protegida por una cubierta transparente, de vidrio o plástico que se caracteriza por una transmitancia, τ_{cub} , que es elevada para las radiaciones componentes del espectro solar y muy baja para las radiaciones del infrarrojo lejano y que protege a la placa del viento. La transmitancia τ_{cub} representa la fracción de la radiación incidente que atraviesa la cubierta; en el vidrio puede llegar a valer aproximadamente 0,9.

Por lo tanto, si la irradiancia solar es G y el área de la placa es A_p , el flujo radiante que incide sobre la placa será $\tau_{\text{cub}} A_p G$. Como la placa sólo absorbe de este flujo la fracción α_p , siendo ésta su absorptancia, y se calienta con ello hasta una temperatura $T_p > T_a$, donde $T_a =$ temperatura del ambiente, se produce una pérdida de calor que es proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a la resistencia R_L (con $R_L = 1/U_c A_p$) y siendo U_c un coeficiente combinado de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción. Por lo tanto, el flujo neto de calor hacia la placa será igual a la ganancia menos las pérdidas:

$$P_{\text{neto}} (W) = \tau_{\text{cub}} \alpha_p A_p G - \frac{(T_p - T_a)}{R_L} = \eta_{\text{sp}} A_p G \quad (2.53)$$

donde η_{sp} es la eficiencia de captura de radiación por la placa, que es menor que la unidad. Es la ecuación de Hotel-Whillier. Puede observarse que el sustrando (que es el término que describe las pérdidas térmicas) en el

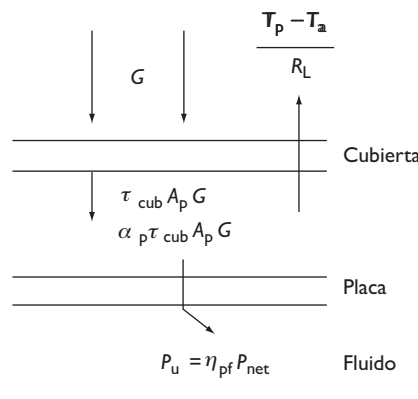


Figura 2.20 Transferencia de calor desde la radiación solar a un fluido en un colector solar. A través de la cubierta pasa un flujo radiante $\tau_{\text{cub}} A_p G$, del cual el flujo neto, P_{net} absorbido es la cantidad anterior menos las pérdidas por radiación, convección y conducción, que son proporcionales a la diferencia de temperatura entre la placa T_p y el ambiente, T_a , e inversamente proporcionales a la resistencia global, R_L , que es un valor combinado de las resistencias a la radiación, convección y conducción.