



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Construcción y caracterización de una cocina
solar térmica modelo Funnel.**

Autor:

Moreira García, Jorge

Tutor(es):

**Velasco Gómez, Eloy
Ingeniería Energética y
Fluidomecánica**

**Andrés Chicote, Manuel
Ingeniería Energética y
Fluidomecánica**

Valladolid, Julio 2021.

Índice

Capítulo 1: Antecedentes.....	5
Capítulo 2: Resumen, palabras clave.....	7
Capítulo 3: Introducción y objetivos	8
3.1 Consumo de energía.....	9
3.2 Uso de la leña.....	10
3.3 Deforestación.....	11
3.4 Combustión de la leña: Problemas de salubridad.....	12
3.5 Alternativas a las cocinas de leña.....	16
3.6 Cocinas solares.....	16
Capítulo 4. El sol como fuente de energía.....	19
Capítulo 5. Desarrollo teórico: Transmisión de calor por radiación	31
5.1 Leyes de la radiación:.....	34
5.2 Factor de forma de la radiación.....	38
5.3 Cálculo de la radiación solar	42
5.3.1 La energía del sol.....	42
5.3.2 La posición del sol.....	42
5.3.3 Definiciones de la posición sol-tierra:	44
5.3.4 La constante solar.....	48
5.3.5 Espectro solar.....	51
5.3.6 El efecto de la atmosfera en la radiación global.....	52
5.3.7 Energía solar en España.....	63
Capítulo 6. Desarrollo teórico del experimento.....	72
6.1 Tipos de colectores solares térmicos.....	73
6.2 Modelo experimental.....	77
6.3 Descripción de los aparatos de medida.....	81
Capítulo 7. Análisis de los datos obtenidos.....	87
7.1 Caracterización cocina solar grande en un día despejado.....	87

7.2 Caracterización cocina solar pequeña en un día despejado.	88
7.3 Otras medidas experimentales.....	91
7.3.1 Presencia de ebullición en la cocina solar grande.	91
7.3. Adquisición de datos en un día nublado.	92
Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros.....	95
Capítulo 9. Anexos	97
9.1 Construcción cocina solar grande.	97
Capítulo 10. Bibliografía.	101

Capítulo 1: Antecedentes.

Una de las líneas de investigación de la sección de termotecnia de la escuela de ingenierías industriales de la Universidad de Valladolid se centra en el estudio de instalaciones de energía solar térmica donde se han desarrollado diferentes proyectos trabajos fin de grado trabajos fin de máster y tesis doctorales siguiendo esta misma línea este proyecto intenta caracterizar alguno de los modelos de cocina solar desarrollados en la actualidad en concreto los modelos de cocinas solar cónicas denominadas también como modelos Funnel.

Dentro de las titulaciones que se imparten en la escuela de ingenierías industriales aquellas que tienen como asignatura la ingeniería térmica desarrollan diferentes prácticas de energía solar térmica dentro de ellas cabe destacar una instalación de colectores solares de aire con diferentes modelos de colectores solares dentro de los cuales están colectores planos tubos de vacío y tubos de alto vacío y finalmente se produce la caracterización de un colector solar plano de laboratorio para determinar su curva de rendimientos.

En este mismo campo y siguiendo una metodología similar en el desarrollo del proyecto se realizarán la caracterización de dos cocinas solares modelo Funnel.

Capítulo 2: Resumen, palabras clave.

Palabras Clave (*Keywords*):

Construcción de cocinas solares, pobreza energética, aprovechamiento de la radiación solar, caracterización de cocinas solares, medidas térmicas.

Este proyecto enseña el uso y funcionamiento de un tipo de colector solar térmico de baja-media temperatura, una cocina solar. También se presentan los grandes beneficios que conlleva el uso de este tipo de cocinas para reducir la pobreza energética, mejorar la higiene doméstica, potabilizar agua, esterilizar objetos, mejorar la ingesta de alimentos en países tercermundistas, evitar enfermedades y concienciar al primer mundo, ofreciendo una base científica que, si bien no es necesaria para hacer uso de una cocina solar, resulta de interés para su diseño y comprensión.

Durante el proyecto se han diseñado, construido y caracterizado experimentalmente dos modelos de cocina solar, tipo Funnel, para determinar experimentalmente las gráficas de comportamiento relacionando evolución de la temperatura con la radiación solar incidente.

This project teaches the use and operation of a type of low-medium temperature solar thermal collector, a solar cooker. The great benefits of using this type of kitchen are also presented to reduce energy poverty, improve domestic hygiene, make water drinkable, sterilize objects, improve food intake in third world countries, avoid diseases and raise awareness in the first world, offering a scientific basis that, although it is not necessary to make use of a solar cooker, is of interest for its design and understanding.

During the project, two models of solar cookers, Funnel type, have been designed, built and experimentally characterized to experimentally determine the behavior graphs relating the evolution of the temperature with the incident solar radiation.

Capítulo 3: Introducción y objetivos

Cuando se habla de necesidades básicas de la humanidad se hace referencia a los elementos mínimos indispensables que los seres humanos necesitamos para vivir. El refugio, el alimento y la vestimenta constituyen necesidades básicas del ser humano.

Cubrir las necesidades básicas requiere energía, la civilización no habría sido posible sin el uso del fuego y posteriormente a los diferentes tipos de energía.

El uso del fuego se considera uno de los descubrimientos más importantes de la humanidad, este descubrimiento represento un cambio esencial en la vida de nuestros antepasados. Las consecuencias del uso del fuego condujeron a modificaciones tanto de orden social como en la anatomía humana.

El fuego permitió la supervivencia del hombre, proporcionaba luz, calor, alimentación adecuada, mejora en sus armas de caza y defensa... Sin embargo, el efecto más importante del uso del fuego fue el aumento de tamaño del cerebro con su consecuente diversificación y especialización de sus funciones, permitiendo capacidades como la memoria a largo plazo y la solución de problemas.

Esto ocurrió en gran medida a la cocción de los alimentos, una vez cocinados los alimentos se logra una digestión más rápida y eficiente. Las proteínas y nutrientes mejoraron el sistema nervioso dando un extra energético.

De esta forma podemos establecer la energía como la piedra fundacional de la civilización. El consumo de energía resulta fundamental para mantener la alimentación, sanidad, cultura y demás facetas sociales.

Actualmente, la disponibilidad de energía es un indicador de la prosperidad de una comunidad. En una sociedad desarrollada la energía se emplea de forma moderna para satisfacer las necesidades de transporte, luchar contra las inclemencias del clima, en la industria etc. Para ello se hace uso de combustibles fósiles y electricidad contando con infraestructuras de suministro muy avanzadas. Sin embargo, en las sociedades no desarrolladas estos usos no existen o son muy minoritarios. Incluso dentro de un mismo país la escasez energética está presente en grandes comunidades, mientras que, en otras comunidades privilegiadas este consumo moderno y abundante existe. En muchas ocasiones esto se produce a escasos kilómetros de distancia e incluso es visible.

En las sociedades de mínimo consumo energético, este se destina al alimento y al fuego. Solamente para cocinar, calentarse, iluminar y protegerse de depredadores, ayudándose de animales domesticados para tareas agrícolas y de transporte.

En el primero mundo se vislumbra una nueva revolución industrial con la sostenibilidad como principal objetivo. Ayudar a conseguirla se posiciona no solo como una tarea altruista y de alto valor, sino como una herramienta para la supervivencia a largo plazo.

3.1 Consumo de energía.

Se denomina energía primaria aquella que procede directamente de una fuente natural:

La energía primaria puede transformarse para ser consumida constituyendo así la energía secundaria. En la Figura 1 se muestra un esquema de la transformación de energía primaria en energía secundaria.

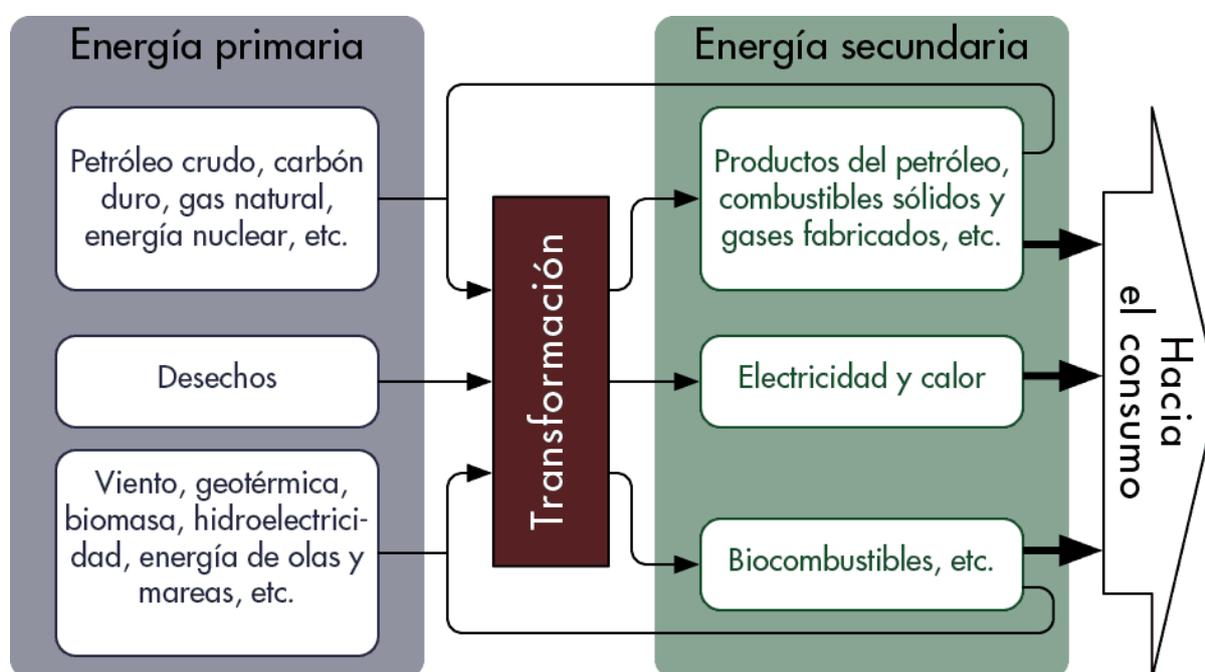


Figura 1. Esquema transformación energía primaria en secundaria. Fuente: (energía s.f.)

Se considera tan solo un 10% del consumo de energía primaria en el mundo está destinado para los países en vías de desarrollo (International Energy Agency 2006).

Esto indica la importancia de la magnitud del tercer mundo frente al primero, donde reside entre el 65% y el 85% de la población mundial.

En el tercer mundo supone un 40% (International Energy Agency 2006).

Para aproximadamente un tercio de la humanidad la mayor parte del consumo energético se emplea en la cocina, y es la población más desfavorecida. Esta población usa mayoritariamente la combustión de la leña.

3.2 Uso de la leña.

La recolección de la leña en los países menos desarrollados es una tarea que se hace a mano o con el uso de animales domesticados, esto supone una tarea pesada y arriesgada. Ocupa la mayor parte del día, pues es una tarea lenta, pesada, fatigosa y que suele suponer el desplazamiento de varios kilómetros.

El gran peso, la forma irregular y poco compacta de la leña sumado a que es recolectada con herramientas manuales primitivas provoca un gran desgaste físico y origina lesiones prematuras al ser transportada largas distancias directamente en la espalda o sobre la cabeza, así como los posibles cortes y magulladuras debidas a la multitud de accidentes que se pueden producir. En la figura 2 se muestra una imagen de gente recolectando leña, para su utilización como combustible.



Figura 2: Portando leña. Fuente: (Steve Evans s.f.).

La disponibilidad de la leña, su fácil uso y su alto poder calorífico la sitúan entre los recursos energéticos más usados por la humanidad. La distribución de su consumo no es homogénea en el mundo, supone aproximadamente un 10% en los países desarrollados y el 90% restante en los países no desarrollado (Garg 1987) .

Aproximadamente la mitad de la leña se emplea para cocinar y la otra mitad para calefacción y procesado en los hogares, además de aplicaciones industriales. En climas templados y fríos la fracción destinada a calefacción es mayor. Su disponibilidad se está reduciendo, especialmente en Asia y en África, a causa de la disminución de la

superficie de bosque por habitante. La carencia de leña provoca dificultades para la población pobre.

3.3 Deforestación.

El uso de la leña como combustible puede ser sostenible si la naturaleza es capaz de regenerar la masa vegetal en la misma o mayor medida de la cual hacemos uso, en caso contrario supondrá la destrucción del medio ambiente natural y la reducción de la biodiversidad.

Llamamos deforestación a la destrucción o agotamiento de la masa forestal, la deforestación se puede producir por causas naturales tales como incendios provocados por rayos o plagas naturales, pero también se puede producir a causa de las actividades del ser humano como pueden ser la tala descontrolada de árboles para uso como combustible o para la edificación.

«En la figura 3 se muestran los efectos de la deforestación.»



Figura 3: Signos de deforestación en Haití, a la izquierda, al comparar con la imagen desde satélite en la frontera con la República Dominicana, a la derecha. Fuente: (NASA s.f.).

De esta manera, las principales causas de la deforestación las podemos encontrar de la mano del ser humano o por fenómenos naturales. De nuestra mano está evitar, solucionar y controlar las primeras y mejorando el estado actual del planeta podremos ayudar a equilibrar las segundas.

Las consecuencias de la deforestación son muy graves, ya que supone:

- La **desertificación**: Una tala indiscriminada o la presencia de incendios provocados sin una posterior reforestación convertirá esa zona en una zona desertificada.

- La **alteración del ciclo del agua**: Los árboles atraen las lluvias, la ausencia de árboles provocaría el desplazamiento de las lluvias hacia otras zonas con mayor vegetación, y también, mediante sus raíces, los árboles evitan desprendimientos de terrenos en terrenos inclinados.
- **Pérdida de biodiversidad**: La deforestación daña los ecosistemas hasta el punto de poder provocar una pérdida total de la biodiversidad y aridez del terreno. Las regiones deforestadas tienen a una erosión del suelo, lo que finalmente se convierte en suelos no productivos que impiden el crecimiento de cualquier tipo de vegetación. Esto hará que no sirva de zona de alimentos o resguardo de animales, zonas de cultivo para el hombre.
- **Modificación del clima global**: La pérdida de masa vegetal provoca cambios en el ciclo del agua como hemos indicado, provoca aumento en la temperatura de la región y disminuye la fotosíntesis provocando un aumento del CO₂ y consecuentemente el deterioro de la capa de ozono con todas sus nefastas consecuencias.

3.4 Combustión de la leña: Problemas de salubridad.

La combustión es una reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias (combustible) con el oxígeno o mezcla de sustancias que contengan oxígeno (comburente).

La madera tiene una estructura fibrosa formada básicamente por celulosa, C₆H₁₂O₅, (60%), que constituye la estructura resistente de los vegetales, y lignina, C₁₉H₂₄O₁₄, que proporciona la rigidez y dureza a la madera. Además, contiene, en menor proporción, resinas, almidón, azúcares, taninos, colorantes, alcoholes, y alcanfor, que son productos de utilidad industrial.

Teóricamente la reacción de combustión la leña la podríamos descomponer de la siguiente forma:

- Reactivos:
 - Combustible: Madera (C_xH_yO_z)
 - Comburente: Aire atmosférico formado principalmente por oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂)
- Productos:
 - CO₂
 - H₂O
 - N₂

«La reacción de combustión de la madera viene dada por la expresión (E-1):

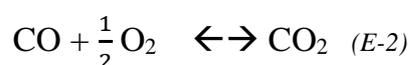


Veamos cómo se originan los productos:

- Monóxido de carbono (CO):

El monóxido de carbono es un gas sin color ni olor. Es un subproducto de la combustión incompleta.

Siempre se produce monóxido de carbono cuando quemamos algún combustible basado en el carbono como es el caso de la madera, se produce monóxido de carbono ya que este está en equilibrio con el dióxido de carbono según la reacción (E-2):



La reacción está más desplazada hacia la derecha cuanto mayor es la temperatura y cuanto menor es la concentración de oxígeno.

Es un gas sin color ni olor muy venenoso que se adhiere a los glóbulos rojos de la sangre impidiendo que éstos puedan fijar el oxígeno, la inhalación de aire con un 0.3% de monóxido de carbono durante media hora produce la muerte.

Es un gas muy peligroso ya que la hemoglobina presenta una afinidad superior a 200 veces mayor por el monóxido de carbono que por el oxígeno, la unión de monóxido de carbono y hemoglobina produce lo que se conoce como carboxihemoglobina (COHb).

El monóxido de carbono es letal debido a que al formarse la carboxihemoglobina, esta ya no puede captar el oxígeno, debido a que el enlace CO-Hb es irreversible.

La muerte se produce cuando entorno al 70% de la hemoglobina circulante se convierte en COHb, esto es suficiente con una exposición de 30 min a un aire con una concentración de 0.3% de monóxido de carbono.

«En la tabla 1 se muestran los efectos de la carboxihemoglobina.»

Tabla 1. Niveles de carboxihemoglobina en relación a los síntomas.

COHb%	Síntomas
< 10%	Asintomático
10-20%	Asintomático o cefalea
20-30%	Mareo, vértigo, náuseas, vómitos, disnea
30-40%	Alteraciones visuales
40-50%	Confusión, desorientación, síncope
> 50%	Coma, disfunción cardio-pulmonar, muerte

COHb%: porcentaje de carboxihemoglobina

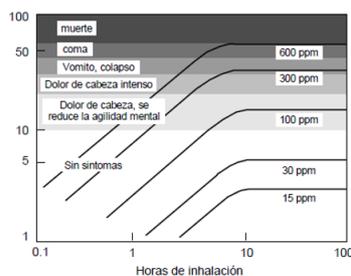


Figura 4: efectos de la carboxihemoglobina. Fuente: (Imagen web s.f.)

- Hidrocarburos sin quemar (HC):

Pueden formarse por:

- Combustión incompleta debido al apagado de la llama.
- Efecto pared y hueco entre pistón y cilindro.
- Descomposición de los hidrocarburos originales para producir compuestos aromáticos y derivados nitrogenados.

Algunos son cancerígenos (hidrocarburos policíclicos aromáticos –PAH- y sus derivados nitrogenados –NPAH-).

Contribuyen a la formación de ozono (muy útil en las capas altas de la atmósfera. Pero perjudicial a nivel del suelo por su carácter oxidante e irritante).

- Óxidos de nitrógeno (NO_x):

Se originan cuando coexisten oxígeno y nitrógeno a altas temperaturas, estos los encontramos en menor medida (E-3).



- Partículas sólidas (Humos):

Se producen por deshidrogenación y craqueo del combustible a elevadas presiones y temperaturas y en ausencia de oxígeno ya que el mezclado del aire y el combustible es difícil.

Son elementos cancerígenos.

Volviendo a la reacción de combustión, viene dada por la ecuación (E-4):



$H_2O, N_2 \rightarrow$ No contaminantes.

$CO_2 \rightarrow$ No t\u00f3xico, efecto invernadero.

$CO, HC, NO_x, SO_x, \text{Part\u00edculas s\u00f3lidas} \rightarrow$ Contaminantes.

Podemos observar que la gran mayor\u00eda de los productos de la combusti\u00f3n de la madera y cualquier combustible en general son contaminantes y afectan a la salud de las personas y al medio ambiente.

En regiones pobres la quema de le\u00f1a dom\u00e9stica se realiza sin chimenea lo que genera mucho humo, especialmente en cocinas de suelo lo que provoca una contaminaci\u00f3n del aire interior. *«En la figura 5 se muestran los efectos del humo en las cocinas tradicionales.»*

En el tercer mundo esto representa la segunda causa de muerte prematura, despu\u00e9s del sida. (Agency 2013).



Figura 5. Demostraci\u00f3n por parte de la fundaci\u00f3n Sol solidari en Camer\u00fan en 2010.

La Organizaci\u00f3n Mundial de la Salud (OMS), incluye el humo creado por combustibles s\u00f3lidos entre los diez principales riesgos de la salud. (Kariherb 2009).

Como hemos visto los principales da\u00f1os producidos por el humo son picor de ojos, dificultad respiratoria, enfermedades cr\u00f3nicas pulmonares y coronarias, enfisema pulmonar, c\u00e1ncer de ojos, garganta y pulm\u00f3n.

Algunos expertos anticipan 10 millones anuales de muertes prematuras debidas al humo dom\u00e9stico en los pr\u00f3ximos a\u00f1os si no se toman medidas para evitarlo.

3.5 Alternativas a las cocinas de leña.

Los combustibles derivados del petróleo (queroseno, gasóleo...), los gases fósiles (propano, butano y gas natural), los biogases y la electricidad presentan una combustión más eficiente y limpia que la leña. Sin embargo, estos combustibles son inalcanzables económicamente para las poblaciones más pobres, además de sufrir de problemas de abastecimiento. Tenemos que considerar que es muy difícil suministrar los combustibles en regiones remotas o mal comunicadas, incrementando el problema el bajo consumo de estas.

Miles de millones de seres humanos carecen de acceso a las formas modernas de energía, y si en muchos casos pese a tener acceso a ellas no pueden abordar su coste económico.

La imposibilidad al acceso de estos combustibles obliga a buscar alternativas realistas, el uso de carbón vegetal generalmente reduce la formación de humo. Este combustible resulta más ligero y homogéneo que la madera y no absorbe humedad ni se pudre. Esto provoca que el coste de transporte sea menor, el problema radica en que es un combustible con menor capacidad calorífica y que para producir un kilogramo de carbón vegetal hay que utilizar entre 6 y 10 kilogramos de madera lo que incrementaría los problemas anteriormente citados debidos a la deforestación.

Como vemos, a medida que ha pasado el tiempo el hombre ha desarrollado diferentes formas para calentar o hervir sus alimentos, pero el uso de combustibles para poder extraer energía en forma de calor conlleva graves problemas ambientales y salubres.

Poder cocinar sin consumo alguno de combustible es el objetivo que tenemos que perseguir, cambiar los combustibles fósiles o derivados del petróleo por energías renovables parece ser la solución.

3.6 Cocinas solares.

Poder cocinar sin consumo alguno de combustible, solamente con la energía solar, parece ser la solución. Una cocina solar consigue cocer únicamente haciendo uso del sol. *«En la figura 6 se muestra una familia haciendo uso de una cocina solar.»*



Figura 6. Empleo de cocinas solares de tipo panel plegables en el campo de refugiado de Iridimi, en Chad occidental.

Para lograr el aumento de temperatura necesario se puede concentrar ópticamente la radiación solar y absorberla para que caliente el alimento, disponiendo para ello de una superficie negra. Al aumentar la temperatura aparecen las pérdidas de calor, las cuales pueden reducirse con cobertores que retienen el calor.

En el año 2000 se establecieron objetivos para el desarrollo del que sería el nuevo milenio con el objetivo de erradicar la pobreza extrema. El uso de la cocina solar podría facilitar 5 de los 8 objetivos

- ✓ 1: Erradicar la pobreza extrema y el hambre
- X 2: Lograr la enseñanza primaria universal
- ✓ 3: Promover la igualdad entre los géneros y la autonomía de la mujer
- ✓ 4: Reducir la mortalidad infantil
- ✓ 5: Mejorar la salud materna
- X 6: Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades
- ✓ 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente
- X 8: Fomentar una asociación mundial para el desarrollo

Capítulo 4. El sol como fuente de energía.

El Sol es una esfera, de unos 700.000 Km. de radio, constituida por una mezcla de gases compuesta, fundamentalmente, por un 70% de hidrógeno y un 27% de Helio. En el núcleo del sol se producen continuamente reacciones nucleares de fusión que son la fuente de su energía. Esta energía fluye hacia capas externas y hacia el espacio por mecanismos de convección y radiación.

El Sol es una gran fuente de energía para cubrir nuestras necesidades. Aparte de la que nos llega directamente de sus rayos, el Sol también es el origen de otras fuentes de energía. Por ejemplo, el viento es causado por las diferencias de temperatura en distintos lugares del mundo, y la energía hidráulica depende del ciclo hidrológico, el cual tiene su origen en la evaporación de las aguas causada por el Sol. Asimismo, los combustibles fósiles (petróleo y carbón, entre otros) se produjeron gracias a la energía transmitida por este astro, luego de transformarse a partir de su forma vegetal.

Tiene un flujo radiante de $3,8 \times 10^{26}$ W, equivalente a una densidad de 62,5 MW por cada metro cuadrado de superficie solar. De esa enorme cantidad de energía radiante, solamente una pequeñísima fracción alcanza a nuestro planeta, pero todavía representa una cantidad muy grande en comparación con el consumo energético en el ámbito mundial. En la utilización de la energía solar, el problema no es la cantidad total disponible, sino las dificultades para su aprovechamiento, dado que ésta se dispersa, repartiéndose por toda la superficie de la Tierra y los océanos. En promedio, la cantidad que llega a nuestra atmósfera exterior equivale a una potencia de 1,4 kw por cada m², cantidad que se reduce hasta aproximadamente 1 kw/m² cuando llega al suelo.

Los cálculos teóricos realizados dan un rango de temperaturas en el núcleo del Sol de ocho a cuarenta millones de grados Kelvin. A estas temperaturas no se mantiene la estructura ni de los átomos, ni de las moléculas, sino que los núcleos y los electrones que los forman se mueven con independencia.

Características del sol.

El sol forma una esfera celeste, en su centro se encuentra el núcleo compuesto por átomos de hidrógeno que funciona igual que un reactor de fusión nuclear, dicha fusión se produce creando helio a una temperatura de 14 millones de grados centígrados. En la zona exterior al núcleo se encuentra la zona radiactiva a través de la cual la energía generada en el núcleo se abre paso hacia el exterior, la temperatura pasa de 14 a 1,5 millones de grados centígrados. A continuación, está la zona conductiva en la que corrientes ascendentes y descendentes transportan el calor hacia la fotosfera, en esta

zona se mantiene una temperatura uniforme próxima a 1,5 millones de grados centígrados. La capa superficial recibe el nombre de Fotosfera, en ella la temperatura es ya de 5.500 grados centígrados. Posteriormente se pueden encontrar algunas capas exteriores como la cromosfera y la corona, la primera está formada por una gran cantidad de espículas (chorros verticales de gas) producidos simultáneamente en la superficie solar, mientras que la segunda es un halo enorme y delgado de gas caliente.

La temperatura en la superficie del Sol es suficientemente alta para que los átomos se encuentren en estado de excitación, pero lo suficientemente baja para que adopten con frecuencia configuraciones conocidas. El análisis del espectro solar indica que el 80% de la materia es hidrógeno, y el resto prácticamente helio.

El Sol en realidad no funciona como un cuerpo emisor negro que se encuentra a una temperatura fija, pues la radiación emitida es el resultado de las diversas capas de él, que absorben y emiten radiación. Para los procesos térmicos se suele considerar al Sol como un cuerpo que emite energía a 5762 K.

La radiación solar

La radiación solar está formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias comprendidas entre $0.3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$). Algunas de ellas pueden ser detectadas por el ojo humano, aquellas que van desde 0.4 a 0.7, constituyendo lo que se conoce como la luz visible. Otras, aunque no son visibles, hacen notar igualmente sus efectos, al ceder a los cuerpos la energía que transportan. La radiación no es algo constante, sino que varía de forma aleatoria debido a los muy diversos efectos que provoca, sobre ella, la atmósfera terrestre.

«En la figura 7 se muestran los distintos tipos de radiación solar.»

La radiación solar es una manifestación electromagnética de la energía, la cual presenta una amplia distribución espectral; es decir, una gran variedad de componentes elementales de distintas longitudes de onda. El rendimiento de cualquier conversión solar depende del margen de radiaciones para las que puede trabajar (los materiales de que estén formados los colectores determinan fundamentalmente esta propiedad).

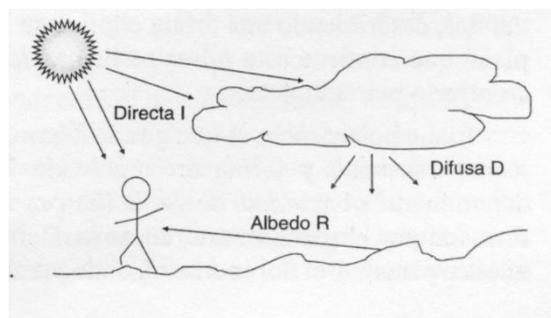


Figura 7: Efecto atmosférico sobre la radiación solar.

Una gran parte de la radiación sufre una absorción y una dispersión en la atmósfera, como consecuencia de su propia estructura y de los agentes variables que allí se encuentran, tales como la contaminación o la nubosidad. Por todo ello, para diseñar sistemas de energía solar, es necesario una caracterización de la radiación disponible bajo diversas condiciones atmosféricas. La radiación global directa (procedente directamente del Sol) se refleja por la presencia de las nubes, el vapor de agua, etc., y se dispersa por las moléculas del agua, el polvo en suspensión, etc. Esta se divide en tres partes:

1) RADIACIÓN DIRECTA

Formada por los rayos procedentes directamente del Sol. Es la fracción directa de la radiación Solar que llega al suelo después de un recorrido vertical está afectada por un coeficiente, e^{-K} denominado coeficiente de transparencia y que representa el poder transmitivo τ , (ley de Beer) (E-5).

Ha podido comprobarse, en primera aproximación que la variación del espesor de la atmósfera afecta al poder transmitivo de un exponente M , de la forma que

$$\tau = (e^{-K})^M = e^{-KM} \quad (E-5)$$

siendo $M = C/\sin\alpha$, con la condición de que $C = 1$ para el nivel del mar. Los valores de M , a nivel del mar, se encuentran especificados en la tabla 1.1. Efectivamente (figura 1.2), los rayos Solares poseen una cierta inclinación que es función de la declinación, de la latitud y de la hora, y como consecuencia, el espesor de la atmósfera crece con la oblicuidad. Los meteorólogos relacionan la longitud de la trayectoria con la masa de aire; quedan así aclarados los conceptos de masa de aire cero (AM0) y masa de aire uno (AM1) comprobándose fácilmente que la masa de aire dos (AM2), corresponde a una altura del Sol sobre el plano horizontal de 30° .

«En la figura 8 se muestra la inclinación de los rayos solares.»

«En la figura 9 se muestra el exponente M del poder transmitivo.»

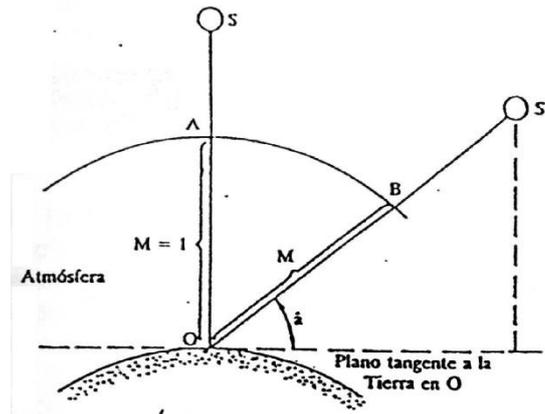


Figura 8: Inclinación de los rayos solares.

\dot{i}	M	\dot{i}	M	\dot{i}	M
1	57,299	31	1,942	61	1,143
2	28,654	32	1,887	62	1,133
3	19,107	33	1,836	63	1,122
4	14,336	34	1,788	64	1,113
5	11,474	35	1,743	65	1,103
6	9,567	36	1,701	66	1,095
7	8,206	37	1,662	67	1,086
8	7,185	38	1,624	68	1,079
9	6,392	39	1,589	69	1,071
10	5,759	40	1,556	70	1,064
11	5,241	41	1,524	71	1,058
12	4,810	42	1,494	72	1,051
13	4,445	43	1,466	73	1,046
14	4,134	44	1,440	74	1,040
15	3,864	45	1,414	75	1,035
16	3,628	46	1,390	76	1,031
17	3,420	47	1,367	77	1,026
18	3,236	48	1,346	78	1,022
19	3,072	49	1,325	79	1,019
20	2,924	50	1,305	80	1,015
21	2,790	51	1,287	81	1,012
22	2,669	52	1,269	82	1,010
23	2,559	53	1,252	83	1,008
24	2,459	54	1,236	84	1,006
25	2,366	55	1,221	85	1,004
26	2,281	56	1,206	86	1,002
27	2,203	57	1,192	87	1,001
28	2,130	58	1,179	88	1,001
29	2,063	59	1,167	89	1,000
30	2,000	60	1,155	90	1,000

Figura 9: Exponente M de la ecuación del poder transmitivo.

2) RADIACIÓN DIFUSA

Al llegar los fotones a las capas atmosféricas y chocar con las moléculas y el polvo en suspensión, sufren difusiones y dispersiones que se traducen en cambios bruscos de dirección. Esta luz difundida finalmente llega también a la superficie, pero al haber cambiado muchas veces de dirección a medida que ha atravesado la atmósfera, lo hace, no como si procediese directamente del disco solar, sino de toda la bóveda celeste. Esta radiación es la que se conoce como difusa. La determinación de la radiación difusa no puede hacerse mediante cálculos, su valor se establece mediante observaciones meteorológicas.

Su intensidad depende a su vez de la intensidad de la radiación directa que es función de la altura del Sol, de la latitud, de la hora Solar y del poder transmitivo de la atmósfera.

En el caso de tiempo muy claro representa una parte muy pequeña de la intensidad de la radiación global (del orden del 10 al 20%); por el contrario, en una atmósfera oscurecida por los humos, polvo y vapor de agua, la intensidad de la radiación directa disminuye mientras que la intensidad de la radiación difusa aumenta. En el caso límite del cielo totalmente cubierto, la intensidad de la radiación difusa constituye el total de la intensidad de la radiación global. Este tipo de difusión tiene mayor influencia para las longitudes de onda pequeñas.

En definitiva, la radiación difusa procedente de todos los puntos del cielo, sin orientación definida, no es susceptible de concentración, como sucede con la radiación directa.

Aunque en un día despejado la radiación directa es mucho mayor que la difusa, ésta última será, evidentemente, la única forma posible de radiación en los días cubiertos, filtrándose más o menos homogéneamente por toda la bóveda celeste a través de la capa nubosa. La radiación difusa supone aproximadamente un tercio de la radiación total que se recibe a lo largo del año.

3) RADIACIÓN DEL ALBEDO

Procedente del suelo, debido a la reflexión de la radiación incidente sobre él. Depende directamente de la naturaleza de éste. Al cociente entre la radiación reflejada y el incidente en la superficie de la tierra se le llama albedo.

Es la reflejada por los cuerpos situados alrededor de la superficie sobre la que nos interesa evaluar la radiación, y hay que añadirla a la directa y difusa que dicha superficie recibe. El albedo de los cuerpos es tanto mayor cuanto más claro sea el color de los mismos. La influencia del albedo del entorno sobre la radiación incidente de un

colector Solar suele ser despreciable, y tan solo en casos de ubicaciones muy particulares, como por ejemplo cuando existen paredes de color claro detrás de los colectores, puede suponer una pequeña ganancia adicional de energía.

Ciclos anuales y diarios

En el movimiento del Sol en el cielo existen dos ciclos: uno diario y otro anual, los cuales hacen que la intensidad de la radiación varíe. En la figura 10 se muestra el ciclo diario del sol.

El primero es causado por la rotación de la Tierra alrededor de su eje, por lo que el Sol, aparentemente, sigue un arco en el cielo todos los días, saliendo en el este y poniéndose en el oeste.



Figura 10: Ciclo diario del sol.

La altura del Sol en el cielo hace que la radiación sea más intensa alrededor del mediodía y menos en la madrugada y la tarde.

La variación de la radiación Solar durante el día, tomando como origen el mediodía Solar, se indica en la *figura 11* para la latitud = 52° N, diferenciándose las curvas correspondientes al verano y al invierno. El doble del área encerrada por cada curva corresponde al flujo total diario. Lógicamente, sumando las aportaciones diarias se pueden obtener los correspondientes valores de las aportaciones mensuales y anuales.

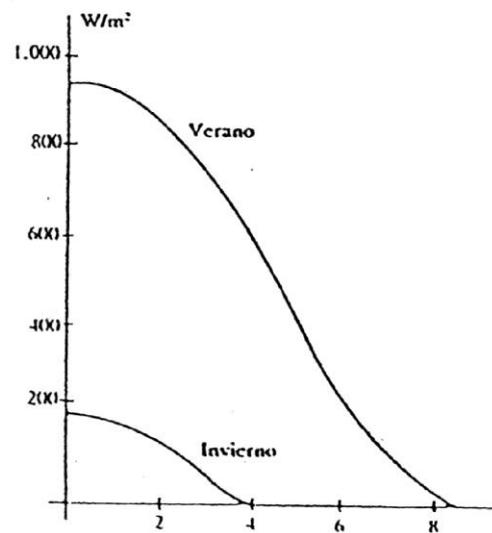
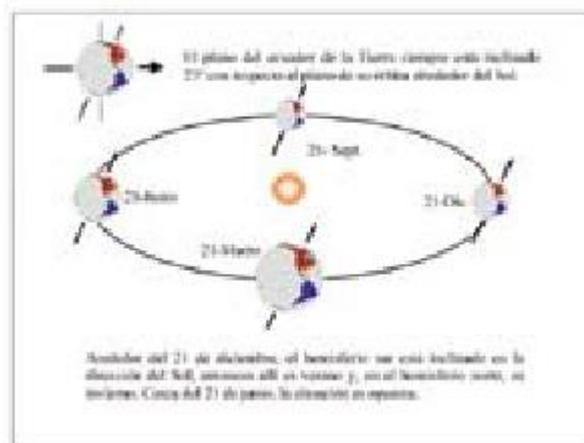


Figura 11: Radiación solar a lo largo del día.

Ciclo anual del Sol

El ciclo anual es causado por la inclinación del eje de la Tierra y la rotación alrededor del Sol (figura 12), las cuales hacen que esté posicionado más alto en el cielo durante el verano que en el invierno y, por consecuencia, la radiación sea más intensa en el verano. Este fenómeno, que es más pronunciado en zonas más lejanas al Ecuador, genera las estaciones.



Inclinación del eje de la Tierra

Figura 12: Inclinación del eje de la Tierra.

Absorción de la radiación solar por materiales

Cuando la radiación del Sol u otra fuente llega a una superficie, una parte es reflexionada, otra es absorbida y otra puede pasar, dependiendo del material del que esté hecha la superficie. Materiales brillantes con colores claros reflejan la mayoría de la radiación, mientras que los oscuros y mates la absorben. Materiales transparentes, como el vidrio, dejan pasar casi toda la radiación. Para capturar y aprovechar la energía solar es que se usan los diferentes materiales.

Cuando se expone una placa metálica al sol, se calienta, pero si además esta placa es negra, la energía radiante del sol es absorbida en mayor medida. Cuando se calienta la placa negra ésta aumenta su temperatura con lo cual empieza a perder calor por los distintos mecanismos: por conducción a través de los soportes que lo sujetan, por convección a través del aire que le rodea y por radiación.

Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno en que un vidrio (u otro material transparente) permite a la luz del Sol entrar en un espacio cerrado, pero no deja que se escape el calor, lo cual aumenta la temperatura dentro de ese espacio (figura 1.6). Esto sucede con el vidrio porque es transparente para la luz visible, pero no para la radiación de onda larga, la cual emite muchos materiales cuando se calienta. Un ejemplo común de este fenómeno es el aumento de la temperatura dentro de un vehículo estacionado bajo el Sol. En la figura 13 se muestra un esquema del efecto invernadero.

El efecto invernadero también se efectúa a escala global. El vapor del agua y de CO₂ actúan en la atmósfera como un vidrio, permitiendo que la radiación llegue a la Tierra y manteniendo el calor. Sin este efecto, la Tierra sería demasiado fría para sostener formas de vida. Sin embargo, por la combustión de fósiles, se están incrementando las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo cual causa que la temperatura del medio ambiente global aumente. A este proceso se le llama calentamiento global. En la aplicación de la energía solar térmica, se aprovecha el efecto invernadero para calentar agua para usos domésticos e industriales, o para generar electricidad.

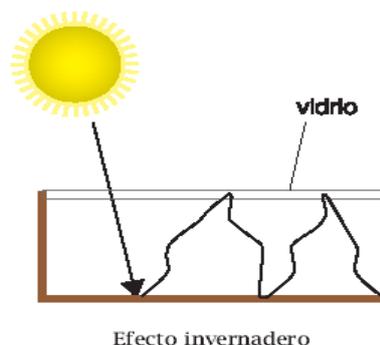


Figura 13: Efecto invernadero

La constante solar.

Al extenderse por el espacio en todas las direcciones, la energía radiante procedente del Sol se reparte en una superficie esférica hipotética, cuyo centro es el foco emisor (el Sol) y cuyo radio crece a la misma velocidad que la propia radiación. Así pues, la intensidad en un punto de dicha superficie esférica, al repartirse la energía solar sobre un área cada vez mayor, será más pequeña cuanto mayor sea el radio de la misma, es decir, cuanto mayor sea la distancia de dicho punto al Sol. Así, la radiación se “debilita” a medida que la distancia aumenta. Calculemos el valor aproximado de esta intensidad (E-6) a la distancia del Sol en que se encuentra nuestro planeta.

$$I = \frac{P}{S} \quad (E-6)$$

Donde:

I = Intensidad, W/m².

P = 4 x 10²⁶ vatios.

S (superficie de una esfera) = 4πR².

R (distancia entre el sol y la tierra) = 1.5 x 10¹¹ metros.

Luego:

$$I = 1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2 = 1.4 \text{ kw/m}^2$$

Este valor coincide con la intensidad de la radiación Solar medida por medio de satélites artificiales en el espacio vacío (justamente por encima de la atmósfera que rodea a nuestro planeta). Con valores más precisos el valor de la Constante Solar es de 1353 W/m². En la figura 14 se muestran variación de la constante solar fuera de la atmósfera.

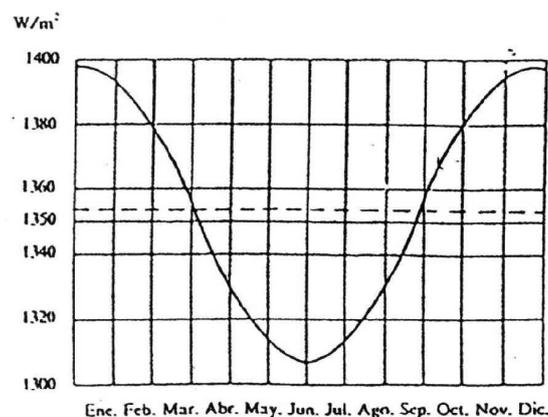


Figura 14: Variación de la constante solar fuera de la atmósfera.

En realidad, la Constante Solar sufre ligeras variaciones debido a que la distancia entre la Tierra y el Sol no es rigurosamente constante, ya que la órbita terrestre no es perfectamente circular sino elíptica (*Figura 15*), siendo un poco mayor durante los meses de diciembre y enero en los que la distancia Sol-Tierra es algo más pequeña, y menor durante los meses de junio y julio en los que dicha distancia es máxima.

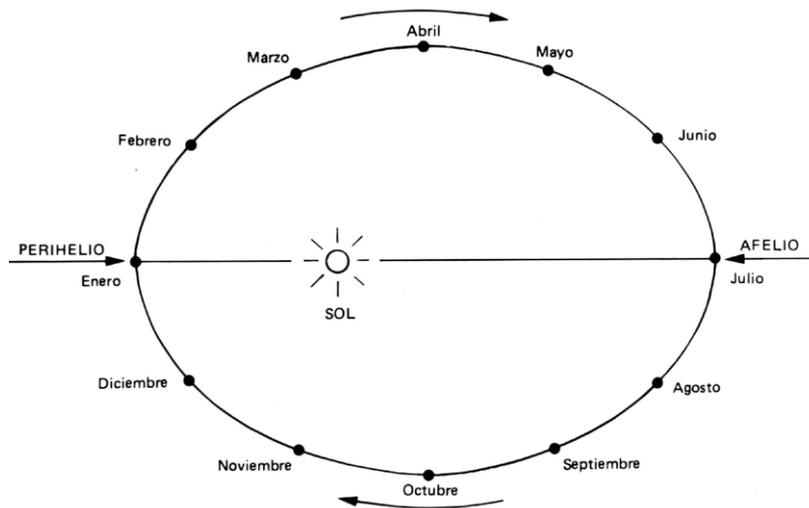


Figura 15: Variación de la distancia entre la Tierra y el Sol.

Una expresión matemática aproximada de la variación viene dada por (E-7):

$$I_s = I \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \left(\cos \frac{360^\circ \cdot N}{365} \right) \right] \quad (E-7)$$

donde:

N = número del día del año.

A la constante Solar también se la conoce como masa de aire cero (AM0), y su valor a nivel del mar se denomina masa de aire uno (AM1).

Espectro solar.

La radiación emitida por el Sol se caracteriza, en los límites de la atmósfera, por desarrollarse según una curva de emisión energética (*Figura 16*), extendiéndose su espectro de forma casi continua desde las longitudes de onda de 0.5 μm , de acuerdo con la Ley de Wien (E-8):

$$\lambda_{\text{max}} \times T = 2897,9 \mu\text{m} \times \text{K} \quad (E-8)$$

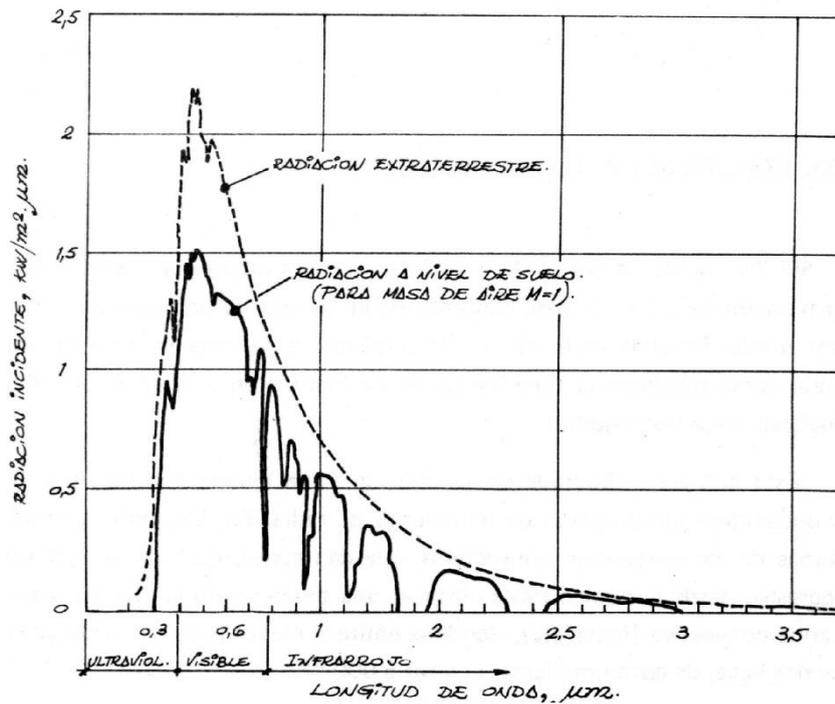


Figura 16: Curva de emisión energética en la atmósfera.

El campo abarcado por la radiación Solar es el correspondiente a las ondas:

- Ultravioletas, de 0.2 a 0.4 μm
- Visibles, de 0.4 a 0.8 μm
- Infrarrojas, de 0.8 a 3 μm

La intensidad de la radiación Solar que incide sobre la superficie de la tierra, en función del tiempo, se encuentra afectada en primer lugar por la nubosidad y en segundo lugar por la altura Solar a través del día. Además, influye la latitud del lugar de la órbita terrestre que define las estaciones y, en consecuencia, el hemisferio norte está expuesto a la radiación solar durante un periodo mayor de tiempo, fenómeno que se hace más pronunciado según aumenta la latitud.

Capítulo 5. Desarrollo teórico: Transmisión de calor por radiación

Los cuerpos pueden perder ó ganar energía térmica sin necesidad de que intervenga un medio físico de transporte. Es decir, que un cuerpo caliente que se coloca en presencia de otros más fríos, pero que no están en contacto físico (por ejemplo, suspendido en el vacío), se observa que pierde energía. Esta pérdida se debe a una emisión electromagnética que se conoce con el nombre de radiación térmica. Se ha advertido que la ausencia del medio de transporte es una característica propia de la transmisión del calor por radiación térmica.

Clasificación de ondas electromagnéticas:

<i>Tipo de Onda</i>	<i>Longitud de Onda</i>
Rayos Cósmicos	$< 0,05 \mu\mu$
Rayos gamma	$0,05 \mu\mu < \lambda < 10 \mu\mu$
Rayos X	$10 \mu\mu < \lambda < 10 m\mu$
Ultravioleta	$10 m\mu < \lambda < 0,4 \mu$
Visible	$0,4 \mu < \lambda < 0,8 \mu$
Infrarroja (Térmica)	$0,8 \mu < \lambda < 0,8 mm$
Ondas Eléctricas	$> 0,8 mm$

Una segunda característica de la radiación térmica es el efecto que produce el nivel de las temperaturas de los cuerpos emisores. En las discusiones desarrolladas en los apartados anteriores demostramos que la velocidad de transmisión del calor por conducción y convección es proporcional a la diferencia de la temperatura que existe entre la fuente y el receptor de este. Por consiguiente, y considerando, por el momento, que las propiedades físicas son constantes, la cantidad de calor transmitido es independiente de la magnitud absoluta de la temperatura, siempre que la diferencia sea la misma.

Este no es el caso de la radiación térmica. La cantidad de calor que se intercambia por radiación es proporcional a la diferencia de la cuarta potencia de las temperaturas absolutas de los cuerpos radiantes (ecuación de Stefan-Boltzmann). Por lo tanto, para

una diferencia de temperatura dada, el calor transmitido es mucho más elevado a las temperaturas altas que a las bajas.

Aún no se ha llegado a una unanimidad de criterios respecto a la emisión de calor radiante, pero se sabe que la velocidad de la transmisión de energía por unidad de superficie radiante viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann (E-9):

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (E-9)$$

En esta ecuación E es la velocidad de emisión de energía por unidad de superficie, T la temperatura absoluta del cuerpo (temperatura en grados Kelvin), σ una constante física universal (Constante de Stefan-Boltzmann) y ε una propiedad de la superficie emisora que se conoce con el nombre de emisividad.

Esta ley la propuso Stefan basándose en pruebas experimentales. Boltzman demostró más tarde que dicha ley podría deducirse de las leyes de la termodinámica y que, por tanto, no está basada en datos experimentales, como en el caso de las leyes de Fourier y de enfriamiento de Newton.

Una de las peculiaridades que tiene esta transmisión de calor por conducción y convección es que los cuerpos intercambiarán calor proporcionalmente con la diferencia de temperaturas que exista entre ellos. Para el caso de la radiación, siempre existe intercambio de energía, si bien, cuando los cuerpos se encuentran a la misma temperatura, el flujo neto de energía intercambiado será nulo.

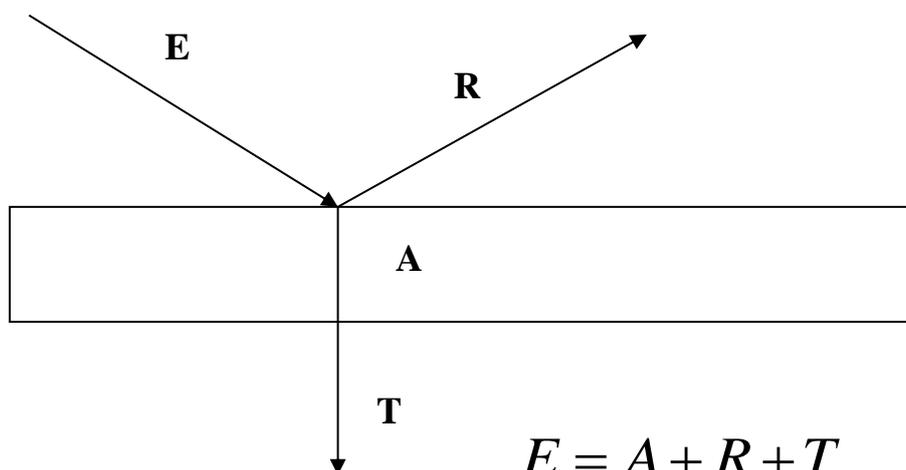
Adicionalmente, para el análisis de la radiación se precisa determinar el conocido como factor de visión o factor de forma, que determina la proporción de energía que abandona una superficie y que alcanza otra.

Finalmente se presentan medios que son capaces de captar parte de la radiación que les atraviesa (medios absorbentes), como es el caso del CO₂ o el H₂O, y otros que son medios transparentes a la radiación como es el caso del aire.

A continuación, y solo de forma esquemática se presentan como resumen algunas de las propiedades y características de este tipo de transporte de calor, por ser de todos los mecanismos presentados anteriormente, el más interesante en relación con las energías renovables, dado que la energía radiante procedente del sol alcanza la tierra mediante este mecanismo.

Propiedades de la radiación:

Absorción , Reflexión y Transmisión.



$$E = A + R + T \quad (E-10)$$

$$1 = \frac{A}{E} + \frac{R}{E} + \frac{T}{E} \quad (E-11)$$

Donde:

- E: Energía Incidente
- R: Energía Reflejada
- A: Energía Absorbida
- T: Energía Transmitida

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (E-12)$$

Donde:

- α : Absortancia: Fracción de radiación absorbida.
- ρ : Reflectancia: Fracción de radiación reflejada.
- τ : Transmitancia: Fracción de radiación transmitida.

Mayoría de sólidos casi opacos: $\alpha + \rho \cong 1$ y $\tau \cong 0$

Gases y vidrios: α y ρ muy bajos y τ muy alto

Para aire seco y limpio: Como el vacío $\alpha + \rho \cong 0$ y $\tau \cong 1$

Casos límite: Cuerpo negro: $\alpha = 1$
 Cuerpo blanco: $\rho = 1$
 Cuerpo transparente: $\tau = 1$

5.1 Leyes de la radiación:

Se desarrolla para sustancias de emisión con espectro continuo.

Definiciones:

- Emitancia Monocromática: W_λ : Cantidad de energía radiante con longitud de onda λ , emitida por un cuerpo por unidad de área y tiempo.
- Emitancia monocromática de un cuerpo negro: $W_{\lambda,n}$
- Emitancia o Potencia Emisiva: W : Cantidad total de energía radiante emitida por un cuerpo por unidad de área y tiempo.

Ley de Prevost: “Cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor de 0 K, emite energía radiante. Esta radiación es tanto mayor cuanto mayor sea su temperatura termodinámica y es independiente de la naturaleza, temperatura y forma de los cuerpos que la rodean”.

Ley de Planck: “La emitancia monocromática de un cuerpo negro depende, no solo de la longitud de onda, sino también de la temperatura absoluta a la que se encuentra el cuerpo” (E-13)

$$W_n = \int_0^{\infty} W_{n\lambda} d\lambda \quad (E-13)$$

Planck fue el primero en aceptar la naturaleza cuántica de la energía radiante y basándose en principios de la termodinámica estadística-cuántica, encontró la ecuación que proporciona la densidad de energía radiante por unidad de volumen y por unidad de longitud de onda (E-14):

$$W_{n\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (E-14)$$

Siendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 = 3,7403 \cdot 10^{-5} \frac{\text{erg} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}} \\ = 3,7403 \cdot 10^8 \frac{\text{W} \cdot \mu\text{m}^4}{\text{m}^2} \\ C_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,4387 \text{ cm} \cdot \text{K} \\ = 1,4387 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \end{array} \right.$$

Donde:

$$\begin{aligned} h: \text{ Constante de Planck} & \quad 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \\ c: \text{ Velocidad de la luz.} & \quad 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ k: \text{ Constante de Boltzmann} & \quad 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/molec.K} \end{aligned}$$

Ley de desplazamiento de Wien: “La longitud de onda correspondiente a la máxima emisividad monocromática es inversamente proporcional a la temperatura absoluta”. Su expresión matemática es (E-15):

$$T\lambda_{max} = C_2/5 \quad (E-15)$$

$$T\lambda_{max} = 0,2898 \text{ cm.K}$$

Al aumentar la temperatura, crece $W_{n\lambda}$, pero de forma más acusada.

Aplicando la condición de máximo a la expresión de la emitancia se puede demostrar que:

Ley de Stefan-Boltzmann.

Según se ha visto anteriormente:

$$W_n = \int_0^{\infty} W_{n\lambda} d\lambda \quad W_{n\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

Por tanto:
$$W_n = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda$$

Realizando el cambio de variable:
$$x = \frac{C_2}{\lambda T} \Rightarrow d\lambda = -\frac{C_2}{x^2 T} dx$$

Luego:
$$W_n = -\frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx$$

Desarrollando la expresión $(e^x - 1)^{-1}$ y tomando como significativos los 4 primeros valores del desarrollo, se obtiene que:

$$W_n = 6,44 \frac{C_1 T^4}{C_2} \Rightarrow W_n = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4 \quad (E-16)$$

Luego la ley de Stefan-Boltzmann puede enunciarse como: “La potencia emisiva desde la superficie de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta” (E-16):

Otras formas de la expresión de Stefan-Boltzmann son:

Generalización de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\varepsilon = \frac{W_\lambda}{W_{n\lambda}} = Cte = \frac{W}{W_n}$$

Def. Cuerpo Gris: Aquel que tiene una emisividad monocromática W_λ independiente de la longitud de onda, definida esa emisividad monocromática ε (E-17) como el cociente entre la emitancia monocromática y la emitancia monocromática del cuerpo negro a la misma longitud de onda.

$$\varepsilon = \frac{W_\lambda}{W_{n\lambda}} \quad (E-17)$$

Para un cuerpo no negro y una determinada longitud de onda:

Emisor selectivo. La emisividad depende de la longitud de onda (E-18).

$$\varepsilon = \frac{W_\lambda}{W_{n\lambda}} = f(\lambda, T) \quad (E-18)$$

Para un cuerpo gris (E-19):

$$W_n = \sigma T^4 \Rightarrow \text{Siendo } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\text{O bien: } W_n = 5,67 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (E-19)$$

Los cuerpos no grises se estudian como si lo fueran aceptando como emisividad monocromática el promedio de las emisividades monocromáticas de toda la banda de longitudes de onda.

Por tanto, la Ley de Stefan-Boltzmann generalizada es (E-20):

$$W = \varepsilon W_n \Rightarrow W = \sigma \varepsilon T^4 \quad (E-20):$$

“La potencia emisiva de un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta y su emisividad”.

Ley de Kirchhoff: “Todo cuerpo es capaz de absorber aquellas radiaciones con la misma longitud de onda que las que él emite”

Para un conjunto cerrado y aislado, se alcanza el equilibrio térmico cuando todos los elementos que los componen tienen la misma temperatura. Para que eso suceda la energía absorbida por cada uno de ellos debe ser igual a la emitida.

Luego: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$

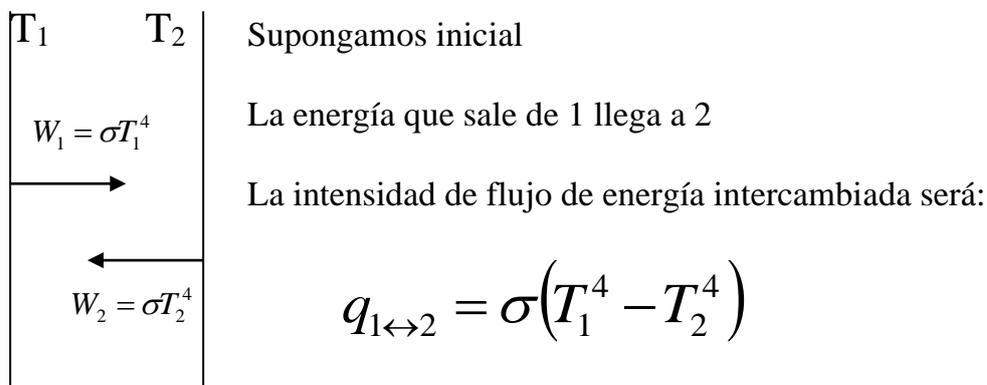
Y para cuerpos grises: $\varepsilon = \alpha$

Ley de Lambert o de la radiación difusa: “la radiación se emite en todas las direcciones con la misma intensidad”.

Se define “Intensidad de radiación”, y la denotaremos como I como la energía emitida por un cuerpo, por unidad de tiempo y ángulo sólido.

Intercambio entre planos infinitos negros y paralelos

La energía que sale por los bordes se considera despreciable.



5.2 Factor de forma de la radiación.

El caso más general e importante es analizar el intercambio de radiación en un sistema de varias superficies a distintas temperaturas y de diferentes emisividades. Para analizar esta situación hay que introducir el concepto de **Factor de Forma** o Factor de Intercambio de Radiación o Factor Angular o Factor de Vista o Factor de Configuración.

Definimos como Factor de Forma entre dos superficies negras A_i y A_j y designaremos como F_{ij} , a la fracción de radiación emitida por A_i , emitida en todas las direcciones, que es interceptada por la superficie negra A_j .

Se desarrollan los conceptos para superficies negras, pero la situación es generalizable a superficies grises que emitan radiación difusa.

Supongamos dos superficies A_1 y A_2 que puedan tener cualquier disposición respecto a las líneas que unen sus centros (*Figura17*).

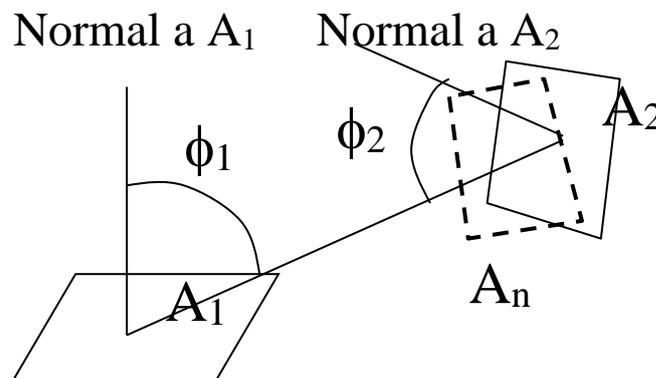


Figura17: Estudio del factor de forma.

La relación existente entre las superficies A_2 y A_n (cuya normal coincide con la línea que une los centros de las superficies A_1 y A_2 , será (E-21):

$$dA_n = \cos \phi_2 \cdot dA_2 \quad (E-21)$$

La expresión que permite calcular el flujo de calor que abandona dA_1 y que llega a dA_2 será (E-22):

$$dQ_{1-2} = I_1 \cdot dA_1 \cos \phi_1 \cdot \frac{dA_2 \cos \phi_2}{r^2} \quad (E-22)$$

El flujo de calor de 1 a 2 será proporcional al área aparente que ve A_1 de A_2 y al área aparente que ve A_2 de A_1 , e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación. Realizando la integración (E23):

$$Q_{1-2} = \int_{A_2} \int_{A_1} I_1 \cdot \frac{\cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2}{r^2} dA_1 dA_2 \quad (E23)$$

Aplicando la definición de factor de Forma:

$$F_{1 \leftrightarrow 2} = \frac{Q_{1 \leftrightarrow 2}}{Q_1}$$

→ Energía que abandona A_1 y llega a A_2
→ Energía que abandona A_1

Aplicando los conceptos de intensidad radiante y sustituyendo en la expresión correspondiente:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1 \pi} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2}{r^2} dA_1 dA_2$$

Por el mismo motivo:

$$F_{2-1} = \frac{1}{A_2 \pi} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2}{r^2} dA_1 dA_2$$

A la vista de la expresión general para calcular el factor de forma, es fácil demostrar que (E-24):

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (E-24)$$

Propiedades del factor de Forma.

El factor de forma es puramente geométrico y no depende de si las superficies son negras o grises, sino que solo depende de las superficies y sus posiciones geométricas relativas.

Propiedad recíproca:

Ya se ha demostrado, a partir de la expresión del factor de forma que:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$$

Propiedad de recinto cerrado:

Cuando una superficie A_1 , está rodeada por n superficies, toda la energía que abandona la superficie A_1 llegará al resto de las superficies, por tanto:

$$Q_1 = Q_{1-1} + Q_{1-2} + Q_{1-3} + \dots + Q_{1-n}$$

Parte de la energía puede recibirla la superficie emisora.

$$Q_{1-1} > 0 \text{ "Se ve a si misma"}. \quad \text{Cuerpo Cóncavo}$$

$$Q_{1-1} = 0 \text{ "No se ve a si misma"}. \quad \text{Cuerpo Convexo}$$

Por tanto:

$$1 = \frac{Q_{1-1}}{Q_1} + \frac{Q_{1-2}}{Q_1} + \frac{Q_{1-3}}{Q_1} + \dots + \frac{Q_{1-n}}{Q_1}$$

Luego:

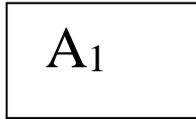
$$F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} + \dots + F_{1-n} = 1$$

Propiedad Aditiva:

Cuando una superficie A_1 emite calor sobre otras n superficies, el factor de forma de ésta sobre el resto se puede expresar como la suma de los factores individuales.

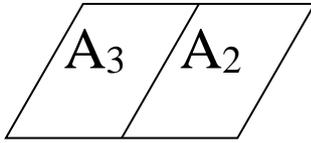
$$F_{1-1,2,3,\dots,n} = F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} + \dots + F_{1-n} = 1$$

$$F_{1-2,3} = F_{1-2} + F_{1-3}$$



Puesto que: $Q_{1-2,3} = Q_{1-2} + Q_{1-3}$

$$\frac{Q_{1-2,3}}{Q_1} = \frac{Q_{1-2}}{Q_1} + \frac{Q_{1-3}}{Q_1}$$



Por tanto: $A_1 F_{1-2,3} = A_1 F_{1-2} + A_1 F_{1-3}$

Luego: $A_2 F_{2,3-1} = A_2 F_{2-1} + A_3 F_{3-1}$

Estas propiedades que se han presentado permiten determinar los factores de forma entre superficies complejas, entre las que se desconocen sus factores de forma, utilizando los factores de forma para geometrías más sencillas que si pueden ser calculados, a partir de las gráficas o ecuaciones correspondientes.

5.3 Cálculo de la radiación solar

5.3.1 La energía del sol.

El Sol es la fuente de energía con que cuenta el hombre, su calor y su luz crean las condiciones básicas que hacen posible la existencia de la vida sobre la Tierra. La energía del Sol puede clasificarse como renovable, ya que el Sol es un enorme reactor de fusión que asegura una entrada de energía fija a la tierra mediante diferentes procesos:

30% de la energía Solar es devuelta por reflexión.

47% se convierte en calor al ser absorbida por la atmósfera, el suelo y los mares.

23% se invierte en la evaporación del agua de los océanos, lagos y ríos.

0.2% es responsable de los movimientos de circulación atmosférica y oceánica.

0.02% es utilizado en la producción de materia viviente, al ser captada por las hojas verdes de las plantas.

Los cálculos teóricos realizados dan un rango de temperaturas en el núcleo del Sol de ocho a cuarenta millones de grados Kelvin. A estas temperaturas no se mantiene la estructura ni de los átomos, ni de las moléculas, sino que los núcleos y los electrones que los forman se mueven con independencia.

La temperatura en la superficie del Sol es de 5762 K, temperatura suficientemente alta para que los átomos se encuentren en estado de excitación, pero lo suficientemente baja para que adopten con frecuencia configuraciones conocidas. El análisis del espectro solar indica que el 80% de la materia es hidrógeno, y el resto prácticamente helio.

El Sol en realidad no funciona como un cuerpo emisor negro que se encuentra a una temperatura fija, pues la radiación emitida es el resultado de las diversas capas de él, que absorben y emiten radiación. Para los procesos térmicos se suele considerar al Sol como un cuerpo que emite energía a 5762 K.

Cada segundo el Sol irradia en todas las direcciones del espacio una energía de 40×10^{28} julios, esto es, genera una potencia de 4×10^{26} kilovatios. Para hacernos una idea de la enorme magnitud que representan estas cifras, basta considerar que la potencia generada por todas las plantas industriales del mundo trabajando juntas sería unos trescientos billones de veces más pequeña. En el breve lapso de tiempo de un solo segundo el Sol irradia mucha más energía que la consumida por todo el género humano desde sus albores hasta nuestros días.

5.3.2 La posición del sol.

Si la temperatura efectiva de la superficie del Sol es de unos 5762 K, la emisión de radiación de un cuerpo negro ideal que se encuentra a 5762 K sería muy parecida a la del Sol. La mayor parte de los fotones emitidos por el Sol, aplicando las leyes de la radiación tendrán una longitud de onda pequeña, comprendida entre $0.3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), aunque solamente las que van desde 0.4 a 0.7 son susceptibles de ser captadas por el ojo humano, formando lo que se conoce como la luz visible.

La luz “no visible” emitida por el Sol, esto es, la radiación con longitud de onda menor que $0.4 \mu\text{m}$ o mayor que $0.7 \mu\text{m}$, transportan también una considerable energía, que es preciso tener en cuenta.

Para poder desarrollar un proyecto de energía solar es fundamental conocer cuanta es la cantidad de energía de la que se dispone para su utilización. Esta energía depende de varios parámetros como la posición en la tierra, el periodo del año considerado, la inclinación de los colectores, la nubosidad, etc.. Algunos de estos parámetros como la nubosidad no pueden ser previstos, pero otros pueden ser evaluados.

Para conocer la intensidad de energía que puede captarse en la Tierra, hay que tener en cuenta la posición de ésta respecto al Sol, que es variable. La Tierra, en su traslación alrededor del Sol, define una trayectoria denominada **eclíptica**. Al mismo tiempo, efectúa un giro diario sobre sí misma alrededor de un eje inclinado respecto al plano de la eclíptica, con un valor constante de $23^\circ 27'$. Para facilitar el análisis de la problemática de la constante variación de la posición Tierra-Sol, se puede utilizar el concepto que se utilizaba históricamente de considerar a la tierra el centro del universo. Resulta más práctico para poder desarrollar los cálculos de radiación imaginar la perspectiva de un observador en la Tierra que viera todos los astros del Universo proyectados en una esfera de diámetro infinito denominada **esfera celeste**, cuyo centro fuera la Tierra. En la figura 18 se muestran los parámetros de la posición Sol-Tierra.

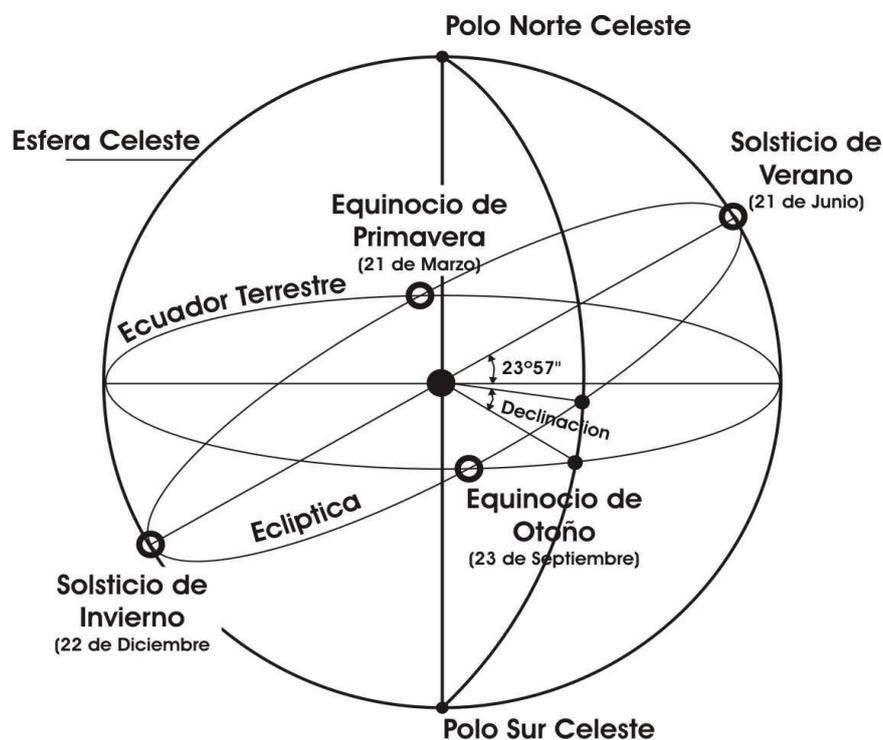


Figura18: Parámetros de la posición Sol-Tierra.

El eje de giro de la esfera celeste coincide con el de la Tierra, es decir, la línea Norte-Sur y el Ecuador celeste coincide por tanto con el Ecuador terrestre. Observando el movimiento del sol alrededor de la tierra se puede ver que la eclíptica forma un ángulo

de $23^{\circ} 27'$ con el plano del Ecuador celeste (o terrestre), al ángulo que forman la línea Tierra-Sol y el plano del Ecuador, medido en el círculo máximo correspondiente, es la declinación solar y , como se observa en la figura, varía desde un valor de $-23^{\circ} 27'$ a $23^{\circ} 27'$.

En el transcurso del año el Sol se traslada sobre la eclíptica. A su posición más alta en ella se le denomina solsticio de verano y a la más baja solsticio de invierno. Las intersecciones de la eclíptica con el Ecuador reciben el nombre de equinoccio de primavera y equinoccio de otoño. En la figura 19 se muestran la altura solar a lo largo del año.

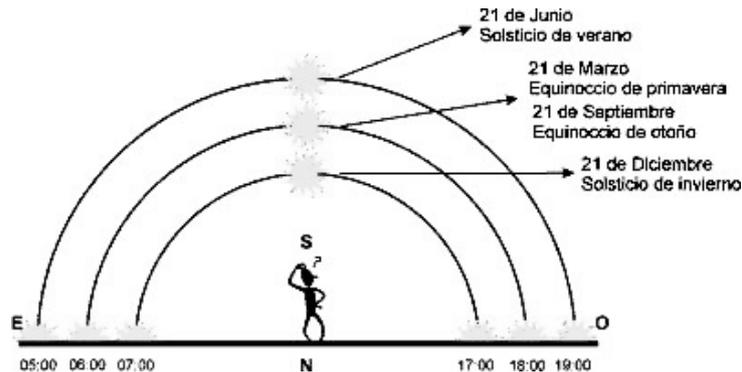


Figura 19: Altura solar a lo largo del año.

Los dos momentos del año en que la duración del día es igual a la de la noche (12 horas) se denominan equinoccios y aproximadamente suceden el 21 de marzo (equinoccio de primavera) y el 21 de septiembre (equinoccio de otoño). El día de más duración del año coincide con el solsticio de verano (21 de junio en el hemisferio Norte) y el de menor duración con el de invierno (21 de diciembre en el hemisferio Norte). Las estaciones son los cuatro períodos delimitados por los dos equinoccios y los dos solsticios.

5.3.3 Definiciones de la posición sol-tierra:

A continuación, se presentan algunos conceptos o definiciones importantes que intervienen como variables geométricas que afectan sobre la determinación de la radiación solar:

LATITUD (ϕ).

Ángulo que forman la vertical del punto geográfico que se considere y el plano del Ecuador. Se muestra en la figura 20.

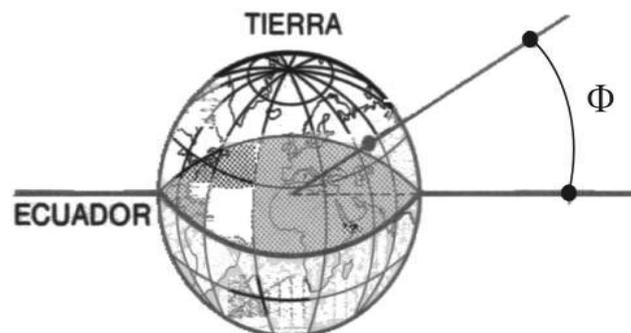


Figura 20: Latitud terrestre.

DECLINACIÓN SOLAR. (δ)

Es el ángulo que forman la línea Tierra-Sol, al mediodía solar, y el plano del Ecuador. Se muestra en la figura 21.

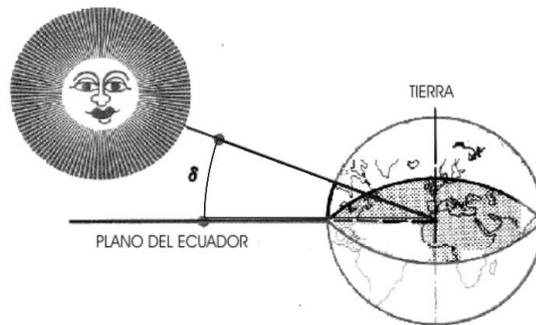


Figura 21: Declinación solar.

INCLINACIÓN. (S)

Es el ángulo que forman el plano de la superficie captadora y la horizontal del punto que se considere. Se muestra en la figura 22.

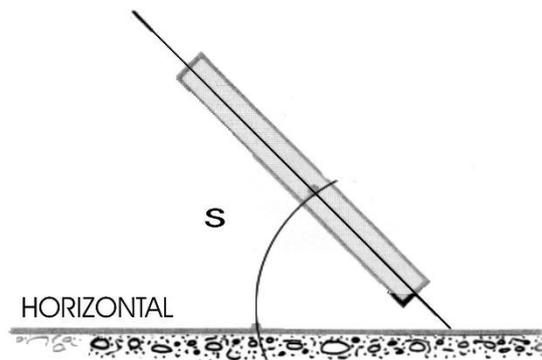


Figura 22: Inclinación.

AZIMUT. (γ)

Es el ángulo que forman la proyección horizontal de la línea perpendicular a la superficie captadora y la línea que pasa por ésta y el sur geográfico, llamada Meridiano del lugar. Se muestra en la figura 23.

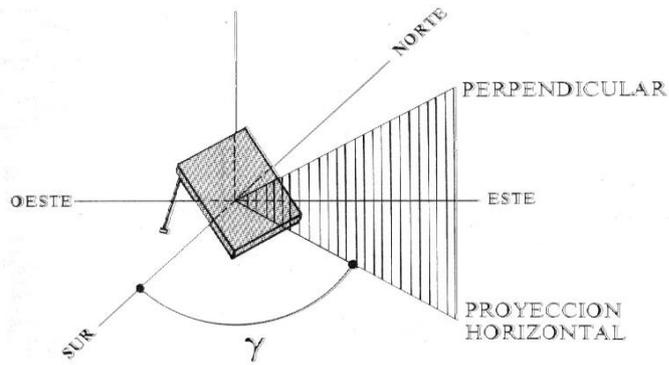


Figura 23: Azimut.

INCIDENCIA. (σ)

Es el ángulo que forman la radiación directa sobre la superficie captadora, es decir, la línea Sol-captador y la perpendicular al captador. Se muestra en la figura 24.

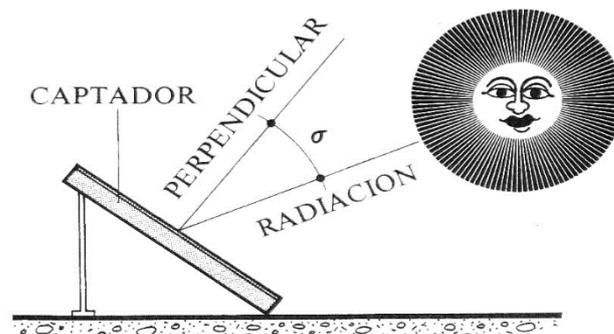


Figura 24: Incidencia.

ALTURA SOLAR.

Es el ángulo que forman los rayos solares sobre la superficie horizontal. (h). A veces se considera el ángulo cenital, que es el que forma el rayo con la vertical, es decir, el complemento de la altura. ($90^\circ - h$). Se muestra en la figura 25.

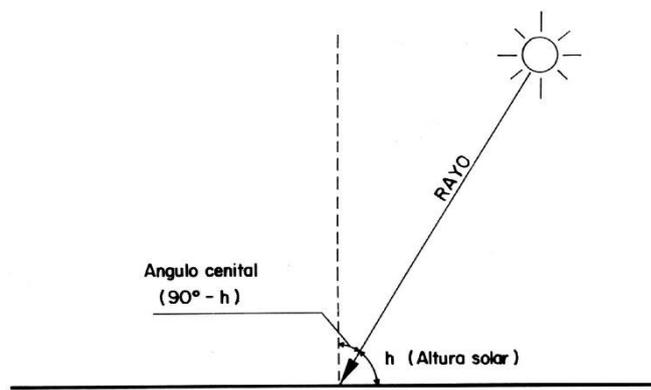


Figura 25: Altura solar.

Par definir la posición del Sol en cada instante con respecto a un observador hipotético que se encuentre inmóvil en un plano horizontal, se utilizan la *altura Solar h* y el *azimut (γ)*.

Es fácil comprender que, tanto el azimut como la altura del Sol en un instante dado, serán distintos para dos observadores situados en diferentes lugares del planeta, por lo que, al usar las tablas que nos expresen estas coordenadas, hay que fijarse bien para qué latitud geográfica están calculadas.

Existen numerosos procedimientos gráficos para determinar la trayectoria Solar. De todos ellos, uno de los más utilizados es el de las Cartas Cilíndricas donde se pueden leer azimuts en ordenadas y alturas solares en abscisas, según las diferentes horas del día (familia de rectas con distinta inclinación). En la figura se representa la carta correspondiente a una latitud de $42^{\circ} 30' N$, que se corresponde con la latitud de Valladolid. En la figura 26 se representa la carta correspondiente a una latitud de $42^{\circ} 30' N$, que se corresponde con la latitud de Valladolid.

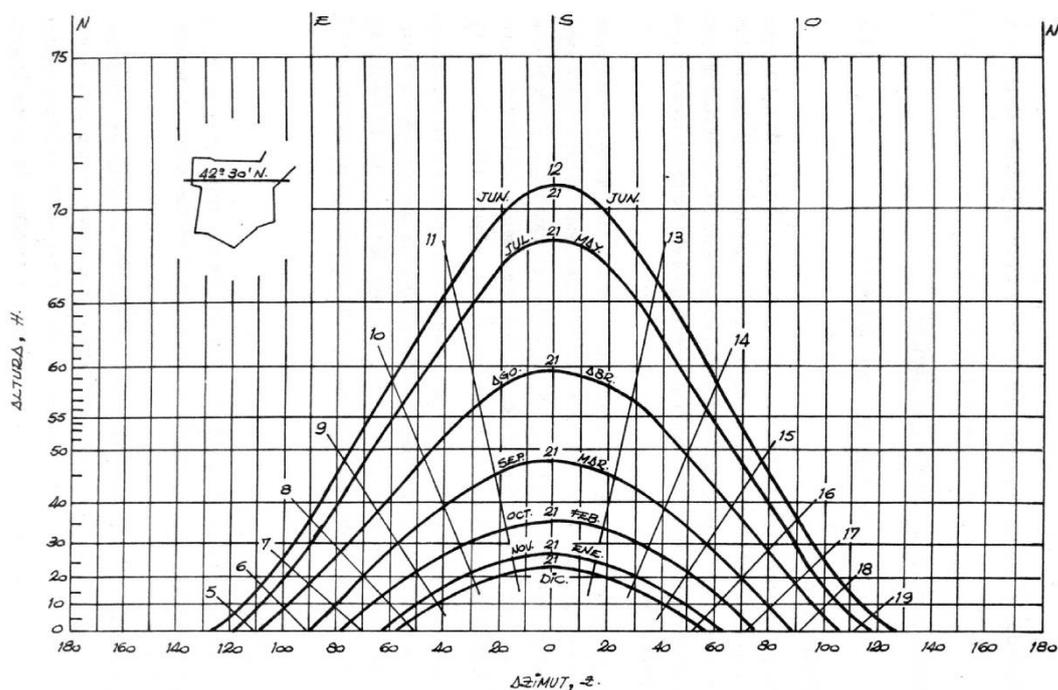


Figura 26: Carta Cilíndrica para una latitud de $42^{\circ}30' N$.

El número de horas de Sol teóricas es el tiempo transcurrido entre el amanecer (orto) y la puesta de sol (ocaso), momentos en que la altura solar vale cero, es decir, el número de horas que el Sol está sobre el horizonte, siendo visible a no ser que lo impidan las nubes. Esta duración del día depende del punto geográfico considerado y de la época del año (Figura 27).

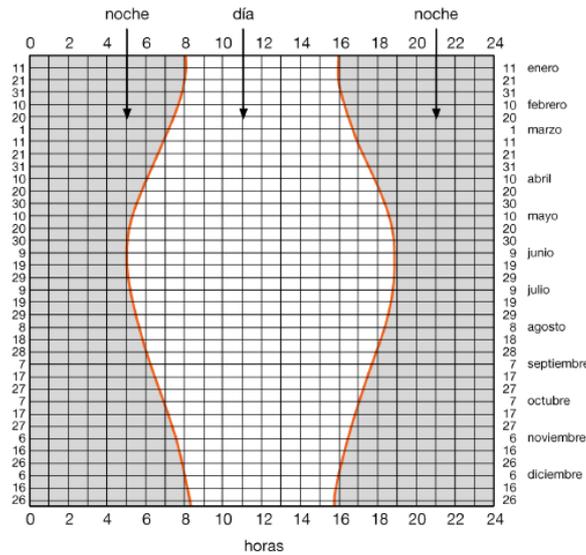
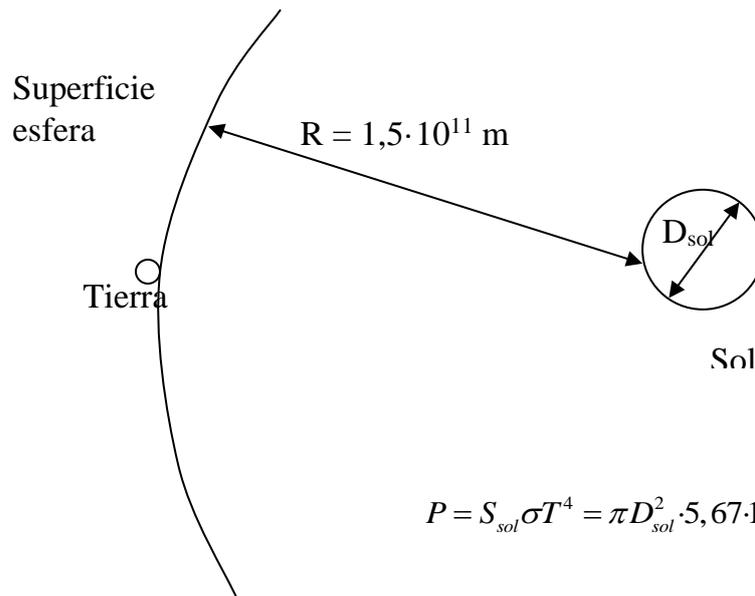


Figura 27: Duración del día para una latitud 40° N.

5.3.4 La constante solar.

Una vez determinadas las variables geométricas que afectan a la radiación solar, se puede estimar la radiación procedente del sol que incide sobre la tierra. Al extenderse por el espacio en todas las direcciones, la energía radiante procedente del Sol se reparte en una superficie esférica hipotética, cuyo centro es el foco emisor (el Sol). Así pues, la intensidad en un punto de la superficie esférica, a medida que aumenta el radio de la esfera, será menor al tener que repartirse la energía solar sobre un área cada vez mayor. En consecuencia, la radiación solar es menor cuando la distancia Sol-Tierra aumenta. Suponiendo una distancia Sol-Tierra constante, se puede calcular el valor aproximado de la intensidad de radiación para esa distancia a la que se encuentra nuestro planeta.



$$P = S_{sol} \sigma T^4 = \pi D_{sol}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (5762)^4$$

$$I = \frac{P}{S} \quad (E-25)$$

Donde:

I = Intensidad, W/m².

P = 4 x 10²⁶ vatios. (T_{sol} = 5762 K, D_{sol} = 1,392 · 10⁹ m)

S (superficie de una esfera) = 4πR².

R (distancia entre el sol y la tierra) = 1.5 x 10¹¹ metros.

Luego: $I = 1353 \text{ W/m}^2 = 1,353 \text{ kw/m}^2$

Este valor coincide con la intensidad de la radiación Solar medida por medio de satélites artificiales en el espacio vacío, justamente por encima de la atmósfera que rodea a nuestro planeta, pero en el exterior de la atmósfera terrestre también se observa que la intensidad de radiación varía a lo largo del año, (*Figura 28*).

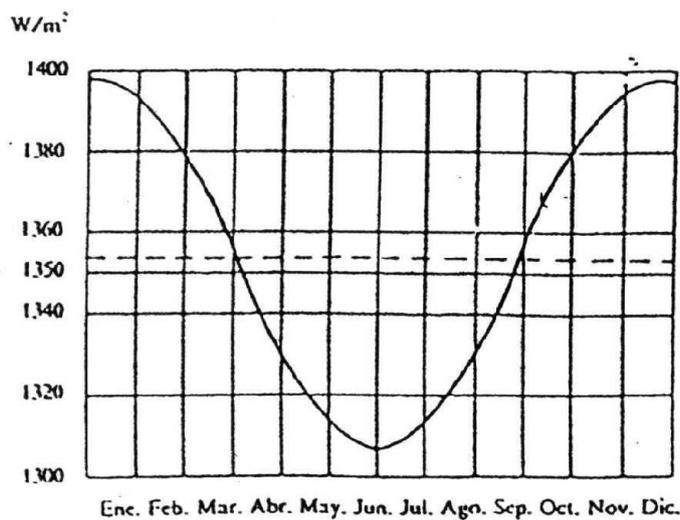


Figura 28: Intensidad de radiación a lo largo del año.

En realidad, la Constante Solar sufre ligeras variaciones debido a que la distancia entre la Tierra y el Sol no es rigurosamente constante, ya que la órbita terrestre no es perfectamente circular sino elíptica, siendo un poco mayor durante los meses de diciembre y enero en los que la distancia Sol-Tierra es algo más pequeña, y menor durante los meses de junio y julio en los que dicha distancia es máxima (*Figura 29*).

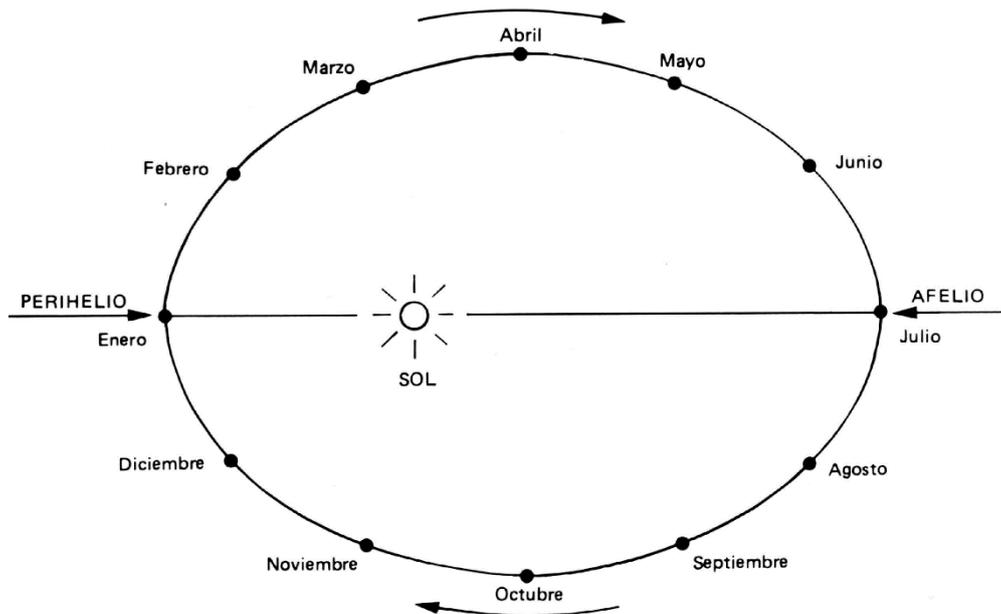


Figura 29: Variación anual de la constante solar debido a la posición del sol.

Una expresión matemática aproximada de la variación viene dada por la ecuación (E-26):

$$I_s = I \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \left(\cos \frac{360^\circ \cdot N}{365} \right) \right] \quad (E-26)$$

Donde:

N = es el número del día del año.

I = el valor de la constante solar

La intensidad de la radiación Solar que incide sobre la superficie de la tierra, en función del tiempo, se encuentra afectada en primer lugar por la nubosidad y en segundo lugar por la altura Solar a través del día.

Además, influye la latitud del lugar de la órbita terrestre que define las estaciones y en consecuencia, el hemisferio norte está expuesto a la radiación solar durante un periodo mayor de tiempo, fenómeno que se hace más pronunciado según aumenta la latitud.

En definitiva, se puede calcular el valor de la intensidad radiante sobre la superficie de la tierra, pero los valores de radiación están influenciados por numerosos factores que modifican esos valores teóricos.

Todos estos factores habrá que tenerles presentes a la hora de determinar la radiación solar que incide sobre la superficie de captadores solares, y que determinarán cual es la orientación más adecuada, el ángulo de inclinación de los colectores para que el rendimiento sea el más adecuado en la instalación, etc.

5.3.5 Espectro solar.

La radiación emitida por el Sol se caracteriza, en los límites de la atmósfera, por desarrollarse según la curva de emisión energética, extendiéndose su espectro de forma casi continua desde longitudes de onda de $0.5 \mu\text{m}$ a $3,5 \mu\text{m}$ siendo muy pequeñas de acuerdo con la Ley de Wien (E-27):

$$\lambda_{\text{max}} \times T = 2897,9 \mu\text{m} \times \text{K} \quad (\text{E-27})$$

Según se muestra en la figura 30, el campo abarcado por la radiación Solar es el correspondiente a las ondas:

- Ultravioletas, de 0.2 a $0.4 \mu\text{m}$
- Visibles, de 0.4 a $0.8 \mu\text{m}$
- Infrarrojas, de 0.8 a $3 \mu\text{m}$

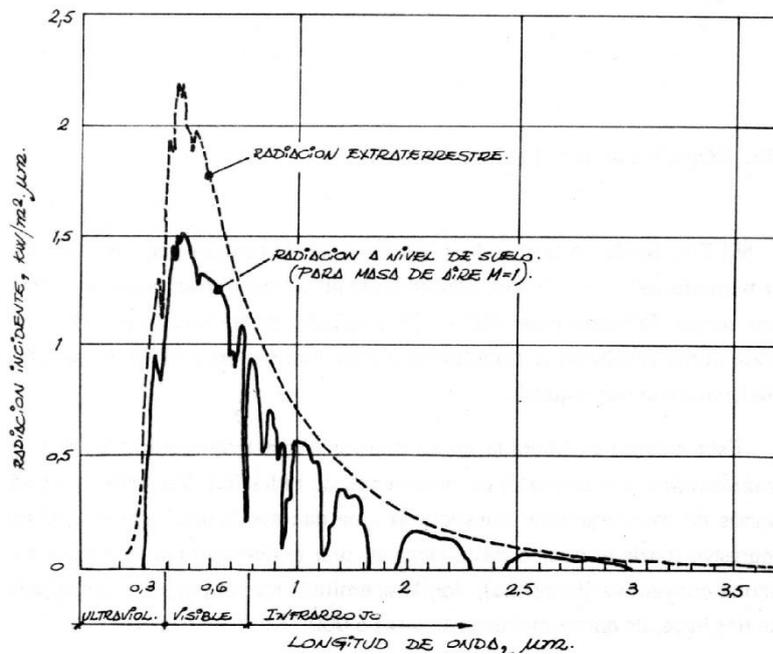


Figura 30: Campo abarcado por la radiación solar.

En la figura se observa cómo se modifica la radiación cuando atraviesa la atmósfera. Pueden observarse dos efectos perfectamente definidos. El primero de ellos es que al atravesar la radiación la atmósfera, por la reflexión en las nubes, la intensidad de radiación que llega al suelo se reduce. El segundo es consecuencia de la composición de la atmósfera terrestre, donde puede verse como para determinadas longitudes de onda la radiación es absorbida por los gases, haciendo que para esas longitudes de onda la radiación no llegue hasta la superficie de la tierra. Cada uno de los picos o saltos observados en el espectro puede ser asociado a uno de los gases que componen la atmósfera.

Uno de los efectos conocidos de la reducción de la capa de ozono es la no absorción de parte de la radiación ultravioleta procedente del sol, que es el origen de diferentes efectos perjudiciales para la vida en la tierra, cuando este tipo de radiación, que no debería llegar con tanta intensidad a la superficie terrestre, no es filtrada por la capa de ozono.

5.3.6 El efecto de la atmosfera en la radiación global.

Ya hemos visto que no toda la radiación (*cantidad de energía incidente sobre una superficie, J/m^2*) solar interceptada por nuestro planeta llega hasta su superficie, debido a que la atmósfera supone un obstáculo al libre paso de la radiación.

De los diversos efectos que provoca la atmósfera sobre la radiación cabe destacar la reflexión en la parte superior de las nubes y la absorción parcial por las diferentes moléculas de gases atmosféricos. Estos fenómenos hacen que la intensidad que llega a la superficie, aun en días despejados y con atmósfera muy limpia, sea como máximo de unos 1100 W/m^2 aunque en la práctica rara vez se miden valores superiores a los 1000 W/m^2 .

También es preciso tener en cuenta que, a pesar de que los rayos solares viajen en línea recta, al llegar a las capas atmosféricas los fotones y chocar con las moléculas y el polvo en suspensión, sufren difusiones y dispersiones que se traducen en cambios bruscos de dirección según se muestra en la figura. Esta luz difundida, finalmente llega también a la superficie, pero al haber cambiado muchas veces de dirección a medida que ha atravesado la atmósfera, lo hace, no como si procediese directamente del disco solar, sino de toda la bóveda celeste. Esta radiación es conocida con el nombre de **difusa**, en contraposición con la radiación **directa**, que es aquella que alcanza la superficie manteniendo la línea recta desde el disco solar.

La suma de las radiaciones directa y difusa es la radiación total, que es la que se precisa a efectos energéticos de su utilización. La radiación difusa hace que un cuerpo siempre esté recibiendo una cierta cantidad de energía por todas sus partes, incluso por las que no recibe la luz del Sol directamente.

Por último, cabe citar la radiación de **albedo**, que es la reflejada por los cuerpos situados alrededor de la superficie sobre la que hay que evaluar la radiación, y hay que añadirla a la directa y difusa que dicha superficie recibe. El albedo de los cuerpos es tanto mayor cuanto más claro sea el color de estos. La influencia del albedo del entorno sobre la radiación incidente de un colector Solar suele ser despreciable, y tan solo en casos de ubicaciones muy particulares, como por ejemplo cuando existen paredes de color claro detrás de los colectores, puede suponer una pequeña ganancia adicional de energía.

A continuación, se analizan las características de los dos principales tipos de radiación.

Radiación directa.

La fracción directa de la radiación Solar que llega al suelo después de un recorrido vertical está afectada por un coeficiente, e^{-K} denominado coeficiente de transparencia y que representa el poder transmitivo τ , (ley de Beer). Ha podido comprobarse, que la variación del espesor de la atmósfera afecta al poder transmitivo mediante un exponente M , según se muestra en la expresión siguiente (E-28):

$$\tau = (e^{-K})^M = e^{-KM} \quad (E-28)$$

Siendo $M = C/\text{sen } \alpha$, con la condición de que $C = 1$ para el nivel del mar.

Los valores de M , a nivel del mar, se pueden calcular a partir de la siguiente expresión en función del ángulo de incidencia del sol (ver figura).

Expresión para determinar el valor de M (E-29):

$$M = \frac{1}{\text{sen} \alpha} \quad (E-29):$$

Ya se ha indicado que los rayos Solares poseen una cierta inclinación que es función de la declinación, de la latitud y de la hora, y como consecuencia, el espesor de la atmósfera crece con la oblicuidad. Los meteorólogos relacionan la longitud de la trayectoria con la masa de aire; estableciendo los conceptos de masa de aire cero (AM0), masa de aire uno (AM1) o para la masa de aire dos (AM2), correspondiente a una altura del Sol que provoca que el sol atraviesa el equivalente a 2 capas de aire hasta llegar a la tierra.

Radiación difusa.

La determinación de la radiación difusa no puede hacerse con cálculos y su valor se establece mediante observaciones meteorológicas. Su intensidad depende de la intensidad de radiación directa que es función de la altura del Sol, de la latitud, de la hora Solar y del poder transmitivo de la atmósfera.

En el caso de tiempo muy claro representa una parte muy pequeña de la intensidad de la radiación global (del orden del 10 al 20%); por el contrario, en una atmósfera oscurecida por los humos, polvo y vapor de agua, la intensidad de la radiación directa disminuye mientras que la intensidad de la radiación difusa aumenta. En el caso límite del cielo totalmente cubierto, la intensidad de la radiación difusa constituye el total de

la radiación global. Este tipo de difusión tiene mayor influencia para las longitudes de onda pequeñas.

En definitiva, la radiación difusa procedente de todos los puntos del cielo, sin orientación definida, no es susceptible de concentración, como sucede con la radiación directa.

Radiación diaria y anual.

A la vista de lo expuesto anteriormente, cualquier información que contenga datos sobre la energía solar se debe analizar cuidadosamente para determinar:

El tipo de radiación medida (directa, difusa o total).

La orientación de la superficie receptora (normalmente horizontal).

La hora o periodo de las mediciones.

Si los valores corresponden a medidas: instantáneas; promedio (total diario medio por mes); o acumuladas (total mensual).

Cuando estos datos no se encuentren disponibles, es necesario utilizar otras medidas meteorológicas existentes, que están íntimamente relacionadas con la energía Solar, tales como: horas de sol, porcentaje posible de nubosidad, porcentaje posible de horas de sol.

Una de las ecuaciones más sencillas es la que proponen Glover y McColloch donde la intensidad de la radiación total diaria se calcule por la ecuación (E-30):

$$I = I_0 \left(0.29 \cdot \cos \lambda + 0.52 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (E-30)$$

Donde:

I_0 = Constante Solar por día.

λ , = Latitud del lugar.

N = Número de horas posibles de Sol por día.

n = Número de horas reales de Sol por día.

Ometto, modificó la fórmula anterior, y propuso (E-31):

$$I = I_0 \cdot (0.26 \cdot \cos \lambda + 0.51) \quad (E-31):$$

En la práctica, la determinación de la radiación que incide sobre una superficie se realiza a partir de tablas de la energía radiante media de un día de cada mes a lo largo de todo el año, sobre superficie horizontal, corrigiendo posteriormente la inclinación del colector.

Para determinar la inclinación del colector, como norma habitual se toma como referencia, siempre orientar el colector hacia el sur y con una inclinación coincidente con la latitud del lugar, que coincidiría con la inclinación sobre la cual la radiación solar incide (como media a lo largo del año) perpendicularmente sobre la superficie del colector. Dado que la altura solar varía a lo largo del año, siendo más alta en verano y

más baja en invierno, las instalaciones que tienen que estar más favorecidas en invierno se inclina más (normalmente 10° más), y si solo se van a utilizar en verano la instalación se inclina menos (normalmente 10° menos).

A continuación, se presentan varias tablas que contienen los valores recomendados para las ciudades españolas y los factores de corrección utilizados para determinar la intensidad radiante sobre superficies inclinadas. El Factor de corrección k para superficies inclinadas, representa el cociente entre la energía total incidente en un día sobre una superficie orientada hacia el sur e inclinada un determinado ángulo, y la energía que recibiría esa superficie en posición horizontal

Energía en megajulios que incide sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
ÁLAVA	4,6	6,9	11,2	13	14,8	16,6	18,1	17,3	14,3	9,5	5,5	4,1	11,3
ALBACETE	6,7	10,5	15	19,2	21,2	25,1	26,7	23,2	18,8	12,4	8,4	6,4	16,1
ALICANTE	8,5	12	16,3	18,9	23,1	24,8	25,8	22,5	18,3	13,6	9,8	7,6	16,8
ALMERÍA	8,9	12,2	16,4	19,6	23,1	24,6	25,3	22,5	18,5	13,9	10	8	16,9
ASTURIAS	5,3	7,7	10,6	12,2	15	15,2	16,8	14,8	12,4	9,8	5,9	4,6	10,9
ÁVILA	6	9,1	13,5	17,7	19,4	22,3	26,3	25,3	18,8	11,2	6,9	5,2	15,1
BADAJOS	6,5	10	13,6	18,7	21,8	24,6	25,9	23,8	17,9	12,3	8,2	6,2	15,8
BALEARES	7,2	10,7	14,4	16,2	21	22,7	24,2	20,6	16,4	12,1	8,5	6,5	15
BARCELONA	6,5	9,5	12,9	16,1	18,6	20,3	21,6	18,1	14,6	10,8	7,2	5,8	13,5
BURGOS	5,1	7,9	12,4	16	18,7	21,5	23	20,7	16,7	10,1	6,5	4,5	13,6
CÁCERES	6,8	10	14,7	19,6	22,1	25,1	28,1	25,4	19,7	12,7	8,9	6,6	16,6
CÁDIZ	8,1	11,5	15,7	18,5	22,2	23,8	25,9	23	18,1	14,2	10	7,4	16,5
CANTABRIA	5,0	7,4	11	13	16,1	17	18,4	15,5	13	9,5	5,8	4,5	11,3
CASTELLÓN	8,0	12,2	15,5	17,4	20,6	21,4	23,9	19,5	16,6	13,1	8,6	7,3	15,3
CEUTA	8,9	13,1	18,6	21	24,3	26,7	26,8	24,3	19,1	14,2	11	8,6	18,1
CIUDAD REAL	7	10,1	15	18,7	21,4	23,7	25,3	23,2	18,8	12,5	8,7	6,5	15,9
CÓRDOBA	7,2	10,1	15,1	18,5	21,8	25,9	28,5	25,1	19,9	12,6	8,6	6,9	16,7
LA CORUÑA	5,4	8	11,4	12,4	15,4	16,2	17,4	15,3	13,9	10,9	6,4	5,1	11,5
CUENCA	5,9	8,8	12,9	17,4	18,7	22	25,6	22,3	17,5	11,2	7,2	5,5	14,6
GERONA	7,1	10,5	14,2	15,9	18,7	19	22,3	18,5	14,9	11,7	7,8	6,6	13,9
GRANADA	7,8	10,8	15,2	18,5	21,9	24,8	26,7	23,6	18,8	12,9	9,6	7,1	16,5
GUADALAJARA	6,5	9,2	14	17,9	19,4	22,7	25	23,2	17,8	11,7	7,8	5,6	15,1
GUIPÚZCOA	5,5	7,7	11,3	11,7	14,6	16,2	16,1	13,6	12,7	10,3	6,2	5	10,9
HUELVA	7,6	11,3	16	19,5	24,1	25,6	28,7	25,6	21,2	14,5	9,2	7,5	17,6
HUESCA	6,1	9,6	14,3	18,7	20,3	22,1	23,1	20,9	16,9	11,3	7,2	5,1	14,6
JAÉN	6,7	10,1	14,4	18	20,3	24,4	26,7	24,1	19,2	11,9	8,1	6,5	15,9
LEÓN	5,8	8,7	13,8	17,2	19,5	22,1	24,2	20,9	17,2	10,4	7	4,8	14,3
LÉRIDA	6	9,9	18	18,8	20,9	22,6	23,8	21,3	16,8	12,1	7,2	4,8	15,2
LUGO	5,1	7,6	11,7	15,2	17,1	19,5	20,2	18,4	15	9,9	6,2	4,5	12,5
MADRID	6,7	10,6	13,6	18,8	20,9	23,5	26	23,1	16,9	11,4	7,5	5,9	15,4
MÁLAGA	8,3	12	15,5	18,5	23,2	24,5	26,5	23,2	19	13,6	9,3	8	16,8
MELILLA	9,4	12,6	17,2	20,3	23	24,8	24,8	22,6	18,3	14,2	10,9	8,7	17,2
MURCIA	10,1	14,8	16,6	20,4	24,2	25,6	27,7	23,5	18,6	13,9	9,8	8,1	17,8
NAVARRA	5	7,4	12,3	14,5	17,1	18,9	20,5	18,2	16,2	10,2	6	4,5	12,6
ORENSE	4,7	7,3	11,3	14	16,2	17,6	18,3	16,6	14,3	9,4	5,6	4,3	11,6
PALENCIA	5,3	9	13,2	17,5	19,7	21,8	24,1	21,6	17,1	10,9	6,6	4,6	14,3
LAS PALMAS	11,2	14,2	17,8	19,6	21,7	22,5	24,3	21,9	19,8	15,1	12,3	10,7	17,6
PONTEVEDRA	5,5	8,2	13	15,7	17,5	20,4	22	18,9	15,1	11,3	6,8	5,5	13,3

LA RIOJA	5,6	8,8	13,7	16,6	19,2	21,4	23,3	20,8	16,2	10,7	6,8	4,8	14
SALAMANCA	6,1	9,5	13,5	17,1	19,7	22,8	24,6	22,6	17,5	11,3	7,4	5,2	14,8
SEGOVIA	5,7	8,8	13,4	18,4	20,4	22,6	25,7	24,9	18,8	11,4	6,8	5,1	15,2
SEVILLA	7,3	10,9	14,4	19,2	22,4	24,3	24,9	23	17,9	12,3	8,8	6,9	16
SORIA	5,9	8,7	12,8	17,1	19,7	21,8	24,1	22,3	17,5	11,1	7,6	5,6	14,5
TARRAGONA	7,3	10,7	14,9	17,6	20,2	22,5	23,8	20,5	16,4	12,3	8,8	6,3	15,1
TENERIFE	10,7	13,3	18,1	21,5	25,7	26,5	29,3	26,6	21,2	16,2	10,8	9,3	19,1
TERUEL	6,1	8,8	12,9	16,7	18,4	20,6	21,8	20,7	16,9	11	7,1	5,3	13,9
TOLEDO	6,2	9,5	14	19,3	21	24,4	27,2	24,5	18,1	11,9	7,6	5,6	15,8
VALENCIA	7,6	10,6	14,9	18,1	20,6	22,8	23,8	20,7	16,7	12	8,7	6,6	15,3
VALLADOLID	5,5	8,8	13,9	17,2	19,9	22,6	25,1	23	18,3	11,2	6,9	4,2	14,7
VIZCAYA	5	7,1	10,8	12,7	15,5	16,7	17,9	15,7	13,1	9,3	6	4,6	11,2
ZAMORA	5,4	8,9	13,2	17,3	22,2	21,6	23,5	22	17,2	11,1	6,7	4,6	14,5
ZARAGOZA	6,3	9,8	15,2	18,3	21,8	24,2	25,1	23,4	18,3	12,1	7,4	5,7	15,6

Factores de corrección de intensidad para superficies inclinadas en función de la latitud del lugar donde se coloque la superficie de captación.

LATITUD = 28°

.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Incl.												
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,05	1,04	1,03	1,01	1	1	1	1,02	1,03	1,05	1,06	1,06
10	1,1	1,08	1,05	1,02	1	0,99	1	1,02	1,06	1,1	1,12	1,12
15	1,14	1,11	1,07	1,02	0,99	0,98	0,99	1,03	1,08	1,13	1,17	1,17
20	1,17	1,13	1,08	1,02	0,97	0,95	0,97	1,02	1,09	1,16	1,21	1,21
25	1,2	1,15	1,08	1	0,95	0,93	0,95	1,01	1,09	1,19	1,25	1,24
30	1,22	1,15	1,07	0,98	0,92	0,89	0,92	0,99	1,09	1,2	1,27	1,27
35	1,23	1,16	1,06	0,96	0,88	0,85	0,88	0,96	1,08	1,21	1,29	1,29
40	1,24	1,15	1,04	0,92	0,84	0,8	0,84	0,93	1,06	1,21	1,3	1,3
45	1,23	1,14	1,01	0,89	0,79	0,75	0,79	0,89	1,04	1,2	1,3	1,3
50	1,22	1,12	0,98	0,84	0,73	0,69	0,73	0,84	1	1,18	1,3	1,3
55	1,2	1,09	0,94	0,79	0,68	0,63	0,67	0,79	0,96	1,15	1,28	1,28
60	1,18	1,05	0,9	0,73	0,61	0,57	0,61	0,73	0,92	1,12	1,26	1,26
65	1,14	1,01	0,85	0,67	0,55	0,5	0,54	0,67	0,86	1,08	1,22	1,23
70	1,1	0,97	0,79	0,61	0,48	0,42	0,47	0,6	0,81	1,03	1,18	1,19
75	1,06	0,91	0,73	0,54	0,4	0,35	0,39	0,53	0,74	0,97	1,14	1,15
80	1	0,86	0,66	0,47	0,33	0,27	0,32	0,46	0,67	0,91	1,08	1,1
85	0,94	0,79	0,59	0,39	0,25	0,19	0,24	0,38	0,6	0,84	1,02	1,04
90	0,88	0,72	0,52	0,32	0,17	0,11	0,16	0,31	0,53	0,77	0,95	0,98

LATITUD = 29°

.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Incli												
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,05	1,04	1,03	1,02	1	1	1	1,02	1,03	1,05	1,07	1,06
10	1,1	1,08	1,05	1,02	1	0,99	1	1,03	1,06	1,1	1,12	1,12
15	1,15	1,11	1,07	1,03	0,99	0,98	0,99	1,03	1,08	1,14	1,18	1,17
20	1,18	1,14	1,08	1,02	0,98	0,96	0,98	1,03	1,1	1,17	1,22	1,22
25	1,21	1,15	1,08	1,01	0,95	0,93	0,95	1,01	1,1	1,2	1,26	1,25
30	1,23	1,16	1,08	0,99	0,92	0,9	0,92	1	1,1	1,21	1,28	1,28
35	1,24	1,17	1,07	0,97	0,89	0,86	0,89	0,97	1,09	1,22	1,3	1,3

40	1,25	1,16	1,05	0,93	0,85	0,81	0,85	0,94	1,07	1,22	1,32	1,31
45	1,24	1,15	1,02	0,9	0,8	0,76	0,8	0,9	1,05	1,21	1,32	1,32
50	1,23	1,13	0,99	0,85	0,75	0,71	0,74	0,85	1,02	1,19	1,31	1,31
55	1,22	1,1	0,95	0,8	0,69	0,64	0,68	0,8	0,98	1,17	1,3	1,3
60	1,19	1,07	0,91	0,75	0,63	0,58	0,62	0,75	0,93	1,14	1,28	1,28
65	1,16	1,03	0,86	0,69	0,56	0,51	0,55	0,69	0,88	1,1	1,24	1,25
70	1,12	0,98	0,8	0,62	0,49	0,44	0,48	0,62	0,82	1,05	1,2	1,22
75	1,07	0,93	0,74	0,55	0,42	0,36	0,41	0,55	0,76	0,99	1,16	1,17
80	1,02	0,87	0,68	0,48	0,34	0,28	0,33	0,48	0,69	0,93	1,1	1,12
85	0,96	0,81	0,61	0,41	0,26	0,21	0,25	0,4	0,62	0,87	1,04	1,06
90	0,9	0,74	0,54	0,33	0,18	0,13	0,17	0,32	0,54	0,79	0,97	1

LATITUD = 34°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,06	1,05	1,04	1,02	1,01	1,01	1,01	1,02	1,04	1,06	1,08	1,07
10	1,12	1,1	1,07	1,04	1,01	1,01	1,02	1,04	1,08	1,12	1,14	1,14
15	1,17	1,13	1,09	1,05	1,01	1	1,01	1,05	1,11	1,17	1,21	1,2
20	1,21	1,16	1,11	1,05	1	0,98	1	1,05	1,13	1,21	1,26	1,25
25	1,25	1,19	1,12	1,04	0,98	0,96	0,99	1,05	1,14	1,24	1,31	1,3
30	1,27	1,2	1,12	1,03	0,96	0,94	0,96	1,03	1,14	1,27	1,34	1,33
35	1,29	1,21	1,11	1,01	0,93	0,9	0,93	1,01	1,14	1,28	1,37	1,36
40	1,31	1,21	1,1	0,98	0,89	0,86	0,89	0,99	1,13	1,29	1,39	1,38
45	1,31	1,21	1,08	0,95	0,85	0,81	0,85	0,95	1,11	1,29	1,4	1,4
50	1,31	1,19	1,05	0,91	0,8	0,76	0,8	0,91	1,09	1,28	1,41	1,4
55	1,3	1,17	1,02	0,86	0,75	0,7	0,75	0,87	1,05	1,26	1,4	1,39
60	1,28	1,14	0,98	0,81	0,69	0,64	0,69	0,82	1,01	1,23	1,38	1,38
65	1,25	1,11	0,93	0,75	0,63	0,58	0,62	0,76	0,96	1,2	1,36	1,36
70	1,21	1,06	0,88	0,69	0,56	0,51	0,55	0,69	0,91	1,15	1,32	1,32
75	1,17	1,01	0,82	0,63	0,49	0,43	0,48	0,63	0,85	1,1	1,28	1,28
80	1,12	0,96	0,76	0,56	0,41	0,36	0,41	0,56	0,78	1,04	1,23	1,24
85	1,06	0,9	0,69	0,48	0,34	0,28	0,33	0,48	0,71	0,98	1,17	1,18
90	1	0,83	0,62	0,41	0,26	0,2	0,25	0,4	0,64	0,91	1,1	1,12

LATITUD = 35°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,06	1,05	1,04	1,02	1,01	1,01	1,01	1,03	1,04	1,06	1,08	1,07
10	1,12	1,1	1,07	1,04	1,02	1,01	1,02	1,04	1,08	1,12	1,15	1,14
15	1,17	1,14	1,09	1,05	1,02	1	1,02	1,05	1,11	1,17	1,21	1,21
20	1,22	1,17	1,11	1,05	1,01	0,99	1,01	1,06	1,13	1,22	1,27	1,26
25	1,25	1,2	1,12	1,05	0,99	0,97	0,99	1,05	1,15	1,25	1,32	1,31
30	1,28	1,21	1,13	1,04	0,97	0,94	0,97	1,04	1,15	1,28	1,36	1,35
35	1,31	1,22	1,12	1,02	0,94	0,91	0,94	1,02	1,15	1,29	1,39	1,38
40	1,32	1,23	1,11	0,99	0,9	0,87	0,9	1	1,14	1,3	1,41	1,4

45	1,33	1,22	1,09	0,96	0,86	0,82	0,86	0,97	1,13	1,3	1,42	1,41
50	1,32	1,21	1,07	0,92	0,81	0,77	0,81	0,93	1,1	1,3	1,43	1,42
55	1,31	1,19	1,03	0,87	0,76	0,72	0,76	0,88	1,07	1,28	1,42	1,41
60	1,29	1,16	0,99	0,82	0,7	0,66	0,7	0,83	1,03	1,25	1,41	1,4
65	1,27	1,12	0,95	0,77	0,64	0,59	0,64	0,77	0,98	1,22	1,38	1,38
70	1,23	1,08	0,9	0,71	0,57	0,52	0,57	0,71	0,93	1,18	1,35	1,35
75	1,19	1,03	0,84	0,64	0,5	0,45	0,5	0,64	0,87	1,13	1,31	1,31
80	1,14	0,98	0,78	0,57	0,43	0,37	0,42	0,57	0,8	1,07	1,26	1,26
85	1,09	0,92	0,71	0,5	0,35	0,29	0,34	0,5	0,73	1	1,2	1,21
90	1,02	0,85	0,64	0,42	0,27	0,21	0,26	0,42	0,66	0,93	1,13	1,15

LATITUD = 36°

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Incli												
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,05	1,04	1,02	1,01	1,01	1,01	1,03	1,05	1,07	1,08	1,08
10	1,13	1,1	1,07	1,04	1,02	1,01	1,02	1,05	1,08	1,13	1,15	1,15
15	1,18	1,14	1,1	1,05	1,02	1,01	1,02	1,06	1,12	1,18	1,22	1,21
20	1,22	1,18	1,12	1,06	1,01	0,99	1,01	1,06	1,14	1,22	1,28	1,27
25	1,26	1,2	1,13	1,05	1	0,98	1	1,06	1,16	1,26	1,33	1,32
30	1,29	1,22	1,13	1,04	0,98	0,95	0,98	1,05	1,16	1,29	1,37	1,36
35	1,32	1,23	1,13	1,02	0,95	0,92	0,95	1,03	1,16	1,31	1,4	1,39
40	1,33	1,24	1,12	1	0,91	0,88	0,91	1,01	1,16	1,32	1,43	1,41
45	1,34	1,23	1,1	0,97	0,87	0,84	0,87	0,98	1,14	1,32	1,44	1,43
50	1,34	1,22	1,08	0,93	0,82	0,78	0,82	0,94	1,12	1,31	1,45	1,44
55	1,33	1,2	1,05	0,89	0,77	0,73	0,77	0,9	1,08	1,3	1,44	1,43
60	1,31	1,17	1,01	0,84	0,71	0,67	0,71	0,84	1,05	1,27	1,43	1,42
65	1,29	1,14	0,96	0,78	0,65	0,6	0,65	0,79	1	1,24	1,41	1,4
70	1,25	1,1	0,91	0,72	0,59	0,53	0,58	0,73	0,95	1,2	1,37	1,37
75	1,21	1,05	0,85	0,66	0,52	0,46	0,51	0,66	0,89	1,15	1,33	1,33
80	1,16	1	0,79	0,59	0,44	0,39	0,44	0,59	0,82	1,09	1,28	1,29
85	1,11	0,94	0,73	0,52	0,37	0,31	0,36	0,51	0,75	1,03	1,23	1,23
90	1,05	0,87	0,65	0,44	0,29	0,23	0,28	0,44	0,68	0,96	1,16	1,17

LATITUD = 37°

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Incli												
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,04	1,03	1,01	1,01	1,02	1,03	1,05	1,07	1,08	1,08
10	1,13	1,1	1,08	1,05	1,02	1,01	1,02	1,05	1,09	1,13	1,16	1,15
15	1,18	1,15	1,1	1,06	1,02	1,01	1,02	1,06	1,12	1,19	1,23	1,22
20	1,23	1,18	1,12	1,06	1,02	1	1,02	1,07	1,15	1,23	1,29	1,28
25	1,27	1,21	1,14	1,06	1	0,98	1	1,07	1,16	1,27	1,34	1,33
30	1,3	1,23	1,14	1,05	0,98	0,96	0,98	1,06	1,17	1,3	1,38	1,37
35	1,33	1,24	1,14	1,03	0,96	0,93	0,96	1,04	1,17	1,32	1,42	1,41

40	1,35	1,25	1,13	1,01	0,92	0,89	0,92	1,02	1,17	1,34	1,44	1,43
45	1,35	1,25	1,11	0,98	0,88	0,85	0,88	0,99	1,15	1,34	1,46	1,45
50	1,35	1,24	1,09	0,94	0,84	0,8	0,84	0,95	1,13	1,33	1,47	1,46
55	1,35	1,22	1,06	0,9	0,78	0,74	0,78	0,91	1,1	1,32	1,47	1,45
60	1,33	1,19	1,02	0,85	0,73	0,68	0,73	0,86	1,06	1,3	1,45	1,44
65	1,31	1,16	0,98	0,8	0,67	0,62	0,66	0,8	1,02	1,26	1,43	1,42
70	1,27	1,12	0,93	0,74	0,6	0,55	0,6	0,74	0,97	1,22	1,4	1,4
75	1,23	1,07	0,87	0,67	0,53	0,48	0,53	0,68	0,91	1,17	1,36	1,36
80	1,19	1,02	0,81	0,6	0,46	0,4	0,45	0,6	0,84	1,12	1,31	1,31
85	1,13	0,96	0,74	0,53	0,38	0,32	0,38	0,53	0,77	1,05	1,26	1,26
90	1,07	0,89	0,67	0,46	0,3	0,25	0,3	0,45	0,7	0,98	1,19	1,2

LATITUD = 38°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,04	1,03	1,02	1,01	1,02	1,03	1,05	1,07	1,08	1,08
10	1,13	1,11	1,08	1,05	1,02	1,02	1,03	1,05	1,09	1,14	1,16	1,16
15	1,19	1,15	1,11	1,06	1,03	1,01	1,03	1,07	1,13	1,19	1,23	1,22
20	1,24	1,19	1,13	1,07	1,02	1,01	1,02	1,07	1,15	1,24	1,3	1,29
25	1,28	1,22	1,14	1,07	1,01	0,99	1,01	1,08	1,17	1,28	1,35	1,34
30	1,31	1,24	1,15	1,06	0,99	0,97	0,99	1,07	1,18	1,31	1,4	1,38
35	1,34	1,25	1,15	1,04	0,96	0,94	0,97	1,05	1,19	1,34	1,43	1,42
40	1,36	1,26	1,14	1,02	0,93	0,9	0,93	1,03	1,18	1,35	1,46	1,45
45	1,37	1,26	1,13	0,99	0,89	0,86	0,89	1	1,17	1,36	1,48	1,47
50	1,37	1,25	1,1	0,96	0,85	0,81	0,85	0,97	1,15	1,35	1,49	1,48
55	1,36	1,23	1,07	0,91	0,8	0,75	0,8	0,92	1,12	1,34	1,49	1,48
60	1,35	1,21	1,04	0,86	0,74	0,69	0,74	0,87	1,08	1,32	1,48	1,47
65	1,33	1,18	0,99	0,81	0,68	0,63	0,68	0,82	1,04	1,29	1,46	1,45
70	1,29	1,14	0,94	0,75	0,61	0,56	0,61	0,76	0,98	1,25	1,43	1,42
75	1,25	1,09	0,89	0,69	0,54	0,49	0,54	0,69	0,93	1,2	1,39	1,39
80	1,21	1,04	0,83	0,62	0,47	0,42	0,47	0,62	0,86	1,14	1,34	1,34
85	1,15	0,98	0,76	0,55	0,4	0,34	0,39	0,55	0,79	1,08	1,29	1,29
90	1,09	0,91	0,69	0,47	0,32	0,26	0,31	0,47	0,72	1,01	1,22	1,23

LATITUD = 39°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,04	1,03	1,02	1,01	1,02	1,03	1,05	1,07	1,09	1,08
10	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,03	1,06	1,1	1,14	1,17	1,16
15	1,19	1,16	1,11	1,07	1,03	1,02	1,03	1,07	1,13	1,2	1,24	1,23
20	1,25	1,2	1,14	1,07	1,03	1,01	1,03	1,08	1,16	1,25	1,31	1,29
25	1,29	1,23	1,15	1,07	1,02	1	1,02	1,08	1,18	1,29	1,36	1,35
30	1,33	1,25	1,16	1,07	1	0,97	1	1,08	1,19	1,33	1,41	1,4
35	1,35	1,27	1,16	1,05	0,97	0,94	0,98	1,06	1,2	1,35	1,45	1,43

40	1,37	1,27	1,15	1,03	0,94	0,91	0,94	1,04	1,19	1,37	1,48	1,46
45	1,38	1,27	1,14	1	0,9	0,87	0,9	1,01	1,18	1,37	1,5	1,48
50	1,39	1,26	1,12	0,97	0,86	0,82	0,86	0,98	1,16	1,37	1,51	1,5
55	1,38	1,25	1,09	0,93	0,81	0,77	0,81	0,94	1,13	1,36	1,51	1,5
60	1,37	1,22	1,05	0,88	0,75	0,71	0,75	0,89	1,1	1,34	1,51	1,49
65	1,35	1,19	1,01	0,83	0,69	0,65	0,69	0,83	1,05	1,31	1,49	1,47
70	1,32	1,15	0,96	0,77	0,63	0,58	0,63	0,77	1	1,27	1,46	1,45
75	1,28	1,11	0,91	0,7	0,56	0,51	0,56	0,71	0,95	1,23	1,42	1,41
80	1,23	1,06	0,84	0,64	0,49	0,43	0,48	0,64	0,88	1,17	1,37	1,37
85	1,18	1	0,78	0,56	0,41	0,35	0,41	0,56	0,81	1,11	1,32	1,32
90	1,12	0,93	0,71	0,49	0,33	0,28	0,33	0,49	0,74	1,04	1,25	1,26

LATITUD = 40°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,01	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,09
10	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,03	1,06	1,1	1,14	1,17	1,16
15	1,2	1,16	1,12	1,07	1,03	1,02	1,04	1,08	1,14	1,21	1,25	1,24
20	1,25	1,2	1,14	1,08	1,03	1,02	1,03	1,09	1,17	1,26	1,32	1,3
25	1,3	1,23	1,16	1,08	1,02	1	1,02	1,09	1,19	1,3	1,38	1,36
30	1,34	1,26	1,17	1,07	1,01	0,98	1,01	1,09	1,2	1,34	1,43	1,41
35	1,37	1,28	1,17	1,06	0,98	0,95	0,98	1,07	1,21	1,37	1,47	1,45
40	1,39	1,29	1,16	1,04	0,95	0,92	0,95	1,05	1,21	1,39	1,5	1,48
45	1,4	1,29	1,15	1,01	0,91	0,88	0,92	1,03	1,2	1,39	1,52	1,5
50	1,41	1,28	1,13	0,98	0,87	0,83	0,87	0,99	1,18	1,39	1,54	1,52
55	1,4	1,27	1,1	0,94	0,82	0,78	0,82	0,95	1,15	1,38	1,54	1,52
60	1,39	1,24	1,07	0,89	0,77	0,72	0,77	0,9	1,12	1,36	1,53	1,51
65	1,37	1,21	1,03	0,84	0,71	0,66	0,71	0,85	1,07	1,34	1,51	1,5
70	1,34	1,17	0,98	0,78	0,64	0,59	0,64	0,79	1,02	1,3	1,49	1,47
75	1,3	1,13	0,92	0,72	0,57	0,52	0,57	0,73	0,97	1,25	1,45	1,44
80	1,25	1,08	0,86	0,65	0,5	0,45	0,5	0,66	0,9	1,2	1,41	1,4
85	1,2	1,02	0,8	0,58	0,43	0,37	0,42	0,58	0,84	1,14	1,35	1,35
90	1,14	0,95	0,73	0,5	0,35	0,29	0,34	0,5	0,76	1,07	1,29	1,29

LATITUD = 41°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,09
10	1,14	1,12	1,09	1,06	1,03	1,02	1,03	1,06	1,1	1,15	1,18	1,17
15	1,21	1,17	1,12	1,07	1,04	1,03	1,04	1,08	1,14	1,21	1,26	1,24
20	1,26	1,21	1,15	1,08	1,04	1,02	1,04	1,09	1,17	1,27	1,33	1,31
25	1,31	1,24	1,17	1,09	1,03	1,01	1,03	1,1	1,2	1,32	1,39	1,37
30	1,35	1,27	1,18	1,08	1,01	0,99	1,02	1,09	1,21	1,35	1,44	1,42
35	1,38	1,29	1,18	1,07	0,99	0,96	0,99	1,08	1,22	1,38	1,49	1,47
40	1,4	1,3	1,18	1,05	0,96	0,93	0,96	1,06	1,22	1,4	1,52	1,5

45	1,42	1,3	1,16	1,03	0,93	0,89	0,93	1,04	1,21	1,41	1,55	1,52
50	1,42	1,3	1,14	0,99	0,88	0,84	0,88	1,01	1,19	1,41	1,56	1,54
55	1,42	1,28	1,12	0,95	0,83	0,79	0,84	0,97	1,17	1,41	1,57	1,54
60	1,41	1,26	1,08	0,91	0,78	0,73	0,78	0,92	1,14	1,39	1,56	1,54
65	1,39	1,23	1,04	0,85	0,72	0,67	0,72	0,87	1,09	1,36	1,54	1,53
70	1,36	1,19	0,99	0,8	0,66	0,61	0,66	0,81	1,04	1,32	1,52	1,5
75	1,32	1,15	0,94	0,73	0,59	0,54	0,59	0,74	0,99	1,28	1,48	1,47
80	1,28	1,1	0,88	0,67	0,52	0,46	0,52	0,67	0,93	1,23	1,44	1,43
85	1,23	1,04	0,82	0,6	0,44	0,39	0,44	0,6	0,86	1,16	1,38	1,38
90	1,17	0,98	0,74	0,52	0,36	0,31	0,36	0,52	0,78	1,09	1,32	1,32

LATITUD = 42°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,08	1,06	1,05	1,03	1,02	1,02	1,02	1,04	1,06	1,08	1,09	1,09
10	1,15	1,12	1,09	1,06	1,04	1,03	1,04	1,06	1,11	1,15	1,18	1,17
15	1,21	1,17	1,13	1,08	1,04	1,03	1,04	1,09	1,15	1,22	1,26	1,25
20	1,27	1,21	1,15	1,09	1,04	1,03	1,05	1,1	1,18	1,28	1,34	1,32
25	1,32	1,25	1,17	1,09	1,04	1,01	1,04	1,1	1,21	1,33	1,4	1,38
30	1,36	1,28	1,19	1,09	1,02	1	1,02	1,1	1,23	1,37	1,46	1,44
35	1,39	1,3	1,19	1,08	1	0,97	1	1,09	1,23	1,4	1,51	1,48
40	1,42	1,31	1,19	1,06	0,97	0,94	0,97	1,08	1,24	1,42	1,54	1,52
45	1,43	1,32	1,18	1,04	0,94	0,9	0,94	1,05	1,23	1,43	1,57	1,54
50	1,44	1,31	1,16	1	0,89	0,86	0,9	1,02	1,21	1,44	1,59	1,56
55	1,44	1,3	1,13	0,97	0,85	0,8	0,85	0,98	1,19	1,43	1,59	1,57
60	1,43	1,28	1,1	0,92	0,79	0,75	0,8	0,93	1,15	1,41	1,59	1,57
65	1,41	1,25	1,06	0,87	0,74	0,69	0,74	0,88	1,11	1,39	1,57	1,55
70	1,38	1,21	1,01	0,81	0,67	0,62	0,67	0,82	1,07	1,35	1,55	1,53
75	1,35	1,17	0,96	0,75	0,6	0,55	0,6	0,76	1,01	1,31	1,52	1,5
80	1,3	1,12	0,9	0,68	0,53	0,48	0,53	0,69	0,95	1,25	1,47	1,46
85	1,25	1,06	0,83	0,61	0,46	0,4	0,46	0,62	0,88	1,19	1,42	1,41
90	1,19	1	0,76	0,54	0,38	0,32	0,38	0,54	0,81	1,12	1,36	1,35

LATITUD = 43°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,08	1,07	1,05	1,03	1,02	1,02	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,09
10	1,15	1,12	1,09	1,06	1,04	1,03	1,04	1,07	1,11	1,16	1,19	1,18
15	1,22	1,18	1,13	1,08	1,05	1,03	1,05	1,09	1,15	1,23	1,27	1,26
20	1,28	1,22	1,16	1,09	1,05	1,03	1,05	1,1	1,19	1,29	1,35	1,33
25	1,33	1,26	1,18	1,1	1,04	1,02	1,04	1,11	1,22	1,34	1,42	1,4
30	1,37	1,29	1,2	1,1	1,03	1	1,03	1,11	1,24	1,38	1,48	1,45
35	1,41	1,31	1,2	1,09	1,01	0,98	1,01	1,1	1,25	1,42	1,52	1,5
40	1,43	1,33	1,2	1,07	0,98	0,95	0,98	1,09	1,25	1,44	1,56	1,54

45	1,45	1,33	1,19	1,05	0,95	0,91	0,95	1,06	1,24	1,45	1,59	1,57
50	1,46	1,33	1,17	1,02	0,91	0,87	0,91	1,03	1,23	1,46	1,61	1,58
55	1,46	1,32	1,15	0,98	0,86	0,82	0,86	1	1,21	1,45	1,62	1,59
60	1,45	1,3	1,12	0,94	0,81	0,76	0,81	0,95	1,17	1,44	1,62	1,59
65	1,43	1,27	1,08	0,89	0,75	0,7	0,75	0,9	1,13	1,41	1,61	1,58
70	1,41	1,23	1,03	0,83	0,69	0,64	0,69	0,84	1,09	1,38	1,58	1,56
75	1,37	1,19	0,98	0,77	0,62	0,57	0,62	0,78	1,03	1,34	1,55	1,53
80	1,33	1,14	0,92	0,7	0,55	0,49	0,55	0,71	0,97	1,28	1,51	1,49
85	1,28	1,08	0,85	0,63	0,47	0,42	0,47	0,64	0,9	1,22	1,45	1,44
90	1,22	1,02	0,78	0,56	0,4	0,34	0,39	0,56	0,83	1,16	1,39	1,38

LATITUD = 44°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,08	1,07	1,05	1,04	1,02	1,02	1,02	1,04	1,06	1,09	1,1	1,1
10	1,16	1,13	1,1	1,06	1,04	1,03	1,04	1,07	1,11	1,16	1,19	1,18
15	1,22	1,18	1,13	1,09	1,05	1,04	1,05	1,09	1,16	1,23	1,28	1,27
20	1,28	1,23	1,17	1,1	1,05	1,04	1,06	1,11	1,2	1,3	1,36	1,34
25	1,34	1,27	1,19	1,11	1,05	1,03	1,05	1,12	1,23	1,35	1,43	1,41
30	1,38	1,3	1,2	1,11	1,04	1,01	1,04	1,12	1,25	1,4	1,49	1,47
35	1,42	1,32	1,21	1,1	1,02	0,99	1,02	1,11	1,26	1,43	1,54	1,52
40	1,45	1,34	1,21	1,08	0,99	0,96	1	1,1	1,26	1,46	1,59	1,56
45	1,47	1,35	1,2	1,06	0,96	0,92	0,96	1,08	1,26	1,48	1,62	1,59
50	1,48	1,34	1,19	1,03	0,92	0,88	0,92	1,05	1,25	1,48	1,64	1,61
55	1,48	1,33	1,16	0,99	0,87	0,83	0,88	1,01	1,22	1,48	1,65	1,62
60	1,47	1,32	1,13	0,95	0,82	0,78	0,82	0,97	1,19	1,47	1,65	1,62
65	1,46	1,29	1,09	0,9	0,76	0,72	0,77	0,92	1,16	1,44	1,64	1,61
70	1,43	1,26	1,05	0,85	0,7	0,65	0,7	0,86	1,11	1,41	1,62	1,59
75	1,4	1,21	1	0,78	0,64	0,58	0,64	0,8	1,06	1,37	1,59	1,56
80	1,36	1,16	0,94	0,72	0,56	0,51	0,56	0,73	0,99	1,32	1,54	1,52
85	1,31	1,11	0,87	0,65	0,49	0,43	0,49	0,66	0,93	1,26	1,49	1,48
90	1,25	1,04	0,8	0,57	0,41	0,35	0,41	0,58	0,85	1,19	1,43	1,42

LATITUD = 45°

Incli	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,08	1,07	1,05	1,04	1,03	1,02	1,03	1,04	1,06	1,09	1,1	1,1
10	1,16	1,13	1,1	1,07	1,04	1,04	1,05	1,07	1,12	1,17	1,2	1,19
15	1,23	1,19	1,14	1,09	1,05	1,04	1,06	1,1	1,17	1,24	1,29	1,27
20	1,29	1,24	1,17	1,11	1,06	1,04	1,06	1,12	1,21	1,31	1,37	1,35
25	1,35	1,28	1,2	1,11	1,06	1,03	1,06	1,13	1,24	1,36	1,45	1,42
30	1,4	1,31	1,21	1,12	1,04	1,02	1,05	1,13	1,26	1,41	1,51	1,48
35	1,43	1,34	1,22	1,11	1,03	1	1,03	1,12	1,27	1,45	1,56	1,53

40	1,46	1,35	1,22	1,09	1	0,97	1,01	1,11	1,28	1,48	1,61	1,58
45	1,49	1,36	1,22	1,07	0,97	0,93	0,97	1,09	1,28	1,5	1,64	1,61
50	1,5	1,36	1,2	1,04	0,93	0,89	0,94	1,06	1,26	1,51	1,67	1,63
55	1,5	1,35	1,18	1,01	0,89	0,84	0,89	1,03	1,24	1,5	1,68	1,65
60	1,5	1,34	1,15	0,97	0,84	0,79	0,84	0,98	1,21	1,49	1,68	1,65
65	1,48	1,31	1,11	0,92	0,78	0,73	0,78	0,93	1,18	1,47	1,67	1,64
70	1,46	1,28	1,07	0,86	0,72	0,67	0,72	0,88	1,13	1,44	1,65	1,62
75	1,43	1,24	1,02	0,8	0,65	0,6	0,65	0,82	1,08	1,4	1,62	1,6
80	1,38	1,19	0,96	0,74	0,58	0,53	0,58	0,75	1,02	1,35	1,58	1,56
85	1,33	1,13	0,89	0,66	0,51	0,45	0,51	0,67	0,95	1,29	1,53	1,51
90	1,28	1,07	0,82	0,59	0,43	0,37	0,43	0,6	0,88	1,22	1,47	1,45

5.3.7 Energía solar en España.

Para finalizar se muestran los planos de radiación de España donde se observa en la cifra superior que hay en cada provincia la energía en kWh que incide por m² de superficie horizontal en un año, y la cifra inferior, el número de horas de sol. Generalmente las cifras suelen referirse a la capital, por lo que los valores para otros puntos de la provincia pueden ser diferentes. En la figura 31 se muestran los planos de radiación en España.

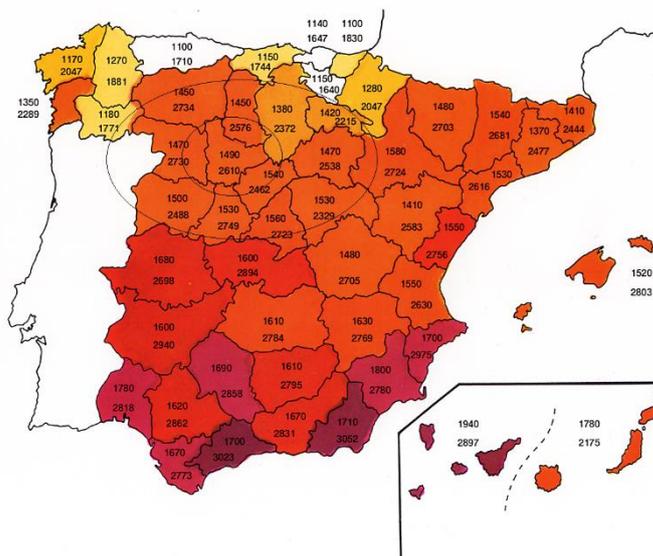


Figura 31 Planos de radiación en España.

En el plano se observa cuáles son las zonas más favorables para la captación de energía solar, siendo éste uno de los motivos para explicar que en dichas zonas la implantación de sistemas solares, esencialmente de captación térmica a baja temperatura para ACS, se encuentren más desarrollados que en otras zonas, donde por su localización el periodo de retorno de la inversión es más elevado.

Castilla y León no obstante se encuentra dentro de las zonas con intensidad radiante buena, con unas 2700 horas de sol y una intensidad radiante de unos 1500 kWh sobre superficie horizontal al año.

Estas condiciones deberían favorecer la implantación de instalaciones de energía solar, sobre todo por la rentabilidad termo-energética que se puede obtener de estas instalaciones.

Pérdidas de radiación solar por sombras

A continuación, se describen dos métodos de estimación de sombras, el primero de ellos estableciendo la posición más desfavorable posible con la altura solar más baja (máxima proyección de sombras por un obstáculo, y otro método propuesto por el IDAE para calcular las pérdidas de radiación solar que experimenta una superficie debidas a las sombras por los obstáculos circundantes. Las pérdidas se expresan como porcentaje de la radiación solar global que incidiría sobre la mencionada superficie si no hubiera sombra.

El primer procedimiento consiste en determinar cuál será la posición más desfavorable, considerando la altura solar media más baja. Este método proporciona la superficie que se puede encontrar en sombra para la posición más desfavorable. En la figura 32 se muestra esquemáticamente en que se basa el método, analizando por ejemplo la sombra que proyecta la presencia de un obstáculo sobre una instalación de colectores. Obsérvese que el mes más desfavorable será aquel que proyecta más sombra sobre los colectores que es cuando el sol esté más bajo a lo largo del año. En resumen, para hacer esta medida se toma la altitud del sol en diciembre.

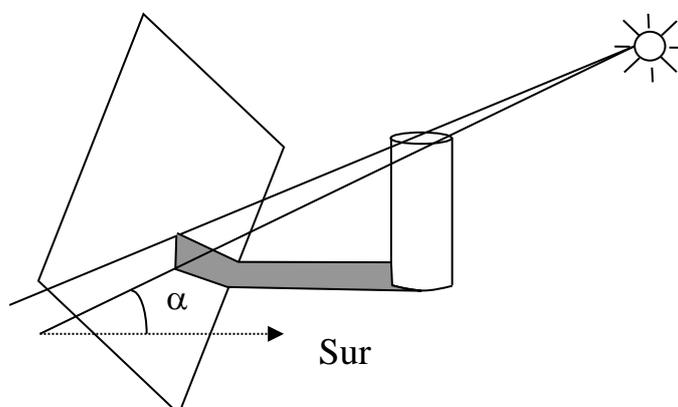


Figura 32: Análisis sombra proyectada por un objeto

Cuando en la situación más desfavorable el porcentaje de sombras se encuentre por debajo del porcentaje de pérdidas por sombras establecido en la norma vigente, la pérdida real por sombras será inferior a la medida por este método, luego asegurará el cumplimiento de la ley sin necesidad de utilizar sistemas más complicados de determinación de pérdidas por sombras, que si serán necesarios cuando el cálculo no sea suficiente para cumplir la legislación vigente, y se precise la determinación de sombras con mayor precisión que la proporcionada por este método.

El procedimiento propuesto por el IDEA consiste en la comparación del perfil de obstáculos que afecta a la superficie de estudio con el diagrama de trayectorias aparentes del Sol. Los pasos a seguir son los siguientes:

a.- Obtención del perfil de obstáculos

Localización de los principales obstáculos que afectan a la superficie, en términos de sus coordenadas de posición azimuth (ángulo de desviación con respecto a la dirección Sur) y elevación (ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal). Para ello suele utilizarse un teodolito, determinando esos dos parámetros respecto al centro de la instalación solar.

b.- Representación del perfil de obstáculos

Una vez obtenidos el azimuth y elevación del obstáculo, se representa el perfil en el diagrama de la figura 33 siguiente, en el que se muestra la banda de trayectorias del Sol a lo largo de todo el año. Este diagrama es válido para las localidades de la Península Ibérica y Baleares. Dicha banda se encuentra dividida en porciones, delimitadas por las horas solares (negativas antes del mediodía solar y positivas después de éste) e identificadas por una letra y un número (A1, A2,...D14). En función de la superficie cubierta se determinará el porcentaje.

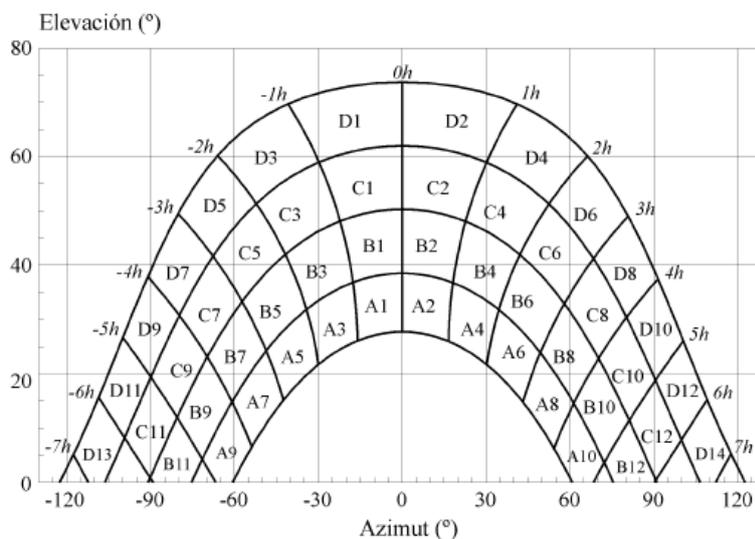


Figura 33: Trayectoria del sol anual.

c.- Selección de la tabla de referencia para los cálculos

Cada una de las porciones de la figura anterior representa el recorrido del Sol en un cierto período de tiempo (una hora a lo largo de varios días) y tiene, por tanto, una determinada contribución a la irradiación solar global anual que incide sobre la superficie de estudio. Así, el hecho de que un obstáculo cubra una de las porciones supone una cierta pérdida de irradiación, en particular aquella que resulte interceptada por el obstáculo.

Deberá escogerse como referencia para el cálculo la tabla más adecuada de entre las que se incluyen a continuación, donde β representa la inclinación del colector y α la orientación. Deberá escogerse aquella que resulte más parecida a la superficie en estudio.

d.- Cálculo final

Los números que figuran en cada casilla de las tablas se corresponden con el porcentaje de irradiación solar global anual que se perdería si la porción correspondiente resultase interceptada por un obstáculo.

La comparación del perfil de obstáculos con el diagrama de trayectorias del Sol permite calcular las pérdidas por sombreado de la irradiación solar global que incide sobre la superficie, a lo largo de todo el año. Para ello se han de sumar las contribuciones de aquellas porciones que resulten total o parcialmente ocultas por el perfil de obstáculos representado.

En el caso de ocultación parcial se utilizará el factor de llenado (fracción oculta respecto del total de la porción) más próximo a los valores: 0,25; 0,50; 0,75 ó 1.

Tabla 5-A

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,03
11	0,00	0,01	0,12	0,44
9	0,13	0,41	0,62	1,49
7	1,00	0,95	1,27	2,76
5	1,84	1,50	1,83	3,87
3	2,70	1,88	2,21	4,67
1	3,15	2,12	2,43	5,04
2	3,17	2,12	2,33	4,99
4	2,70	1,89	2,01	4,46
6	1,79	1,51	1,65	3,63
8	0,98	0,99	1,08	2,55
10	0,11	0,42	0,52	1,33
12	0,00	0,02	0,10	0,40
14	0,00	0,00	0,00	0,02

Tabla 5-B

$\beta = 0^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,18
11	0,00	0,01	0,18	1,05
9	0,05	0,32	0,70	2,23
7	0,52	0,77	1,32	3,56
5	1,11	1,26	1,85	4,66
3	1,75	1,60	2,20	5,44
1	2,10	1,81	2,40	5,78
2	2,11	1,80	2,30	5,73
4	1,75	1,61	2,00	5,19
6	1,09	1,26	1,65	4,37
8	0,51	0,82	1,11	3,28
10	0,05	0,33	0,57	1,98
12	0,00	0,02	0,15	0,96
14	0,00	0,00	0,00	0,17

Tabla 5-C

$\beta = 90^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,15
11	0,00	0,01	0,02	0,15
9	0,23	0,50	0,37	0,10
7	1,66	1,06	0,93	0,78
5	2,76	1,62	1,43	1,68
3	3,83	2,00	1,77	2,36
1	4,36	2,23	1,98	2,69
2	4,40	2,23	1,91	2,66
4	3,82	2,01	1,62	2,26
6	2,68	1,62	1,30	1,58
8	1,62	1,09	0,79	0,74
10	0,19	0,49	0,32	0,10
12	0,00	0,02	0,02	0,13
14	0,00	0,00	0,00	0,13

Tabla 5-D

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 30^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,10
11	0,00	0,00	0,03	0,06
9	0,02	0,10	0,19	0,56
7	0,54	0,55	0,78	1,80
5	1,32	1,12	1,40	3,06
3	2,24	1,60	1,92	4,14
1	2,89	1,98	2,31	4,87
2	3,16	2,15	2,40	5,20
4	2,93	2,08	2,23	5,02
6	2,14	1,82	2,00	4,46
8	1,33	1,36	1,48	3,54
10	0,18	0,71	0,88	2,26
12	0,00	0,06	0,32	1,17
14	0,00	0,00	0,00	0,22

Tabla 5-E

$\beta = 90^\circ$ $\alpha = 30^\circ$	A	B	C	D
13	0,10	0,00	0,00	0,33
11	0,06	0,01	0,15	0,51
9	0,56	0,06	0,14	0,43
7	1,80	0,04	0,07	0,31
5	3,06	0,55	0,22	0,11
3	4,14	1,16	0,87	0,67
1	4,87	1,73	1,49	1,86
2	5,20	2,15	1,88	2,79
4	5,02	2,34	2,02	3,29
6	4,46	2,28	2,05	3,36
8	3,54	1,92	1,71	2,98
10	2,26	1,19	1,19	2,12
12	1,17	0,12	0,53	1,22
14	0,22	0,00	0,00	0,24

Tabla 5-F

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 60^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,14
11	0,00	0,00	0,08	0,16
9	0,02	0,04	0,04	0,02
7	0,02	0,13	0,31	1,02
5	0,64	0,68	0,97	2,39
3	1,55	1,24	1,59	3,70
1	2,35	1,74	2,12	4,73
2	2,85	2,05	2,38	5,40
4	2,86	2,14	2,37	5,53
6	2,24	2,00	2,27	5,25
8	1,51	1,61	1,81	4,49
10	0,23	0,94	1,20	3,18
12	0,00	0,09	0,52	1,96
14	0,00	0,00	0,00	0,55

Tabla 5-G

$\beta = 90^\circ$ $\alpha = 60^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,43
11	0,00	0,01	0,27	0,78
9	0,09	0,21	0,33	0,76
7	0,21	0,18	0,27	0,70
5	0,10	0,11	0,21	0,52
3	0,45	0,03	0,05	0,25
1	1,73	0,80	0,62	0,55
2	2,91	1,56	1,42	2,26
4	3,59	2,13	1,97	3,60
6	3,35	2,43	2,37	4,45
8	2,67	2,35	2,28	4,65
10	0,47	1,64	1,82	3,95
12	0,00	0,19	0,97	2,93
14	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabla 5-H

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = -30^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,22
11	0,00	0,03	0,37	1,26
9	0,21	0,70	1,05	2,50
7	1,34	1,28	1,73	3,79
5	2,17	1,79	2,21	4,70
3	2,90	2,05	2,43	5,20
1	3,12	2,13	2,47	5,20
2	2,88	1,96	2,19	4,77
4	2,22	1,60	1,73	3,91
6	1,27	1,11	1,25	2,84
8	0,52	0,57	0,65	1,64
10	0,02	0,10	0,15	0,50
12	0,00	0,00	0,03	0,05
14	0,00	0,00	0,00	0,08

Tabla 5-I

$\beta = 90^\circ$ $\alpha = -30^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,24
11	0,00	0,05	0,60	1,28
9	0,43	1,17	1,38	2,30
7	2,42	1,82	1,98	3,15
5	3,43	2,24	2,24	3,51
3	4,12	2,29	2,18	3,38
1	4,05	2,11	1,93	2,77
2	3,45	1,71	1,41	1,81
4	2,43	1,14	0,79	0,64
6	1,24	0,54	0,20	0,11
8	0,40	0,03	0,06	0,31
10	0,01	0,06	0,12	0,39
12	0,00	0,01	0,13	0,45
14	0,00	0,00	0,00	0,27

Tabla 5-J

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = -60^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,56
11	0,00	0,04	0,60	2,09
9	0,27	0,91	1,42	3,49
7	1,51	1,51	2,10	4,76
5	2,25	1,95	2,48	5,48
3	2,80	2,08	2,56	5,68
1	2,78	2,01	2,43	5,34
2	2,32	1,70	2,00	4,59
4	1,52	1,22	1,42	3,46
6	0,62	0,67	0,85	2,20
8	0,02	0,14	0,26	0,92
10	0,02	0,04	0,03	0,02
12	0,00	0,01	0,07	0,14
14	0,00	0,00	0,00	0,12

Tabla 5-K

$\beta = 90^\circ$ $\alpha = -60^\circ$	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	1,01
11	0,00	0,08	1,10	3,08
9	0,55	1,60	2,11	4,28
7	2,66	2,19	2,61	4,89
5	3,36	2,37	2,56	4,61
3	3,49	2,06	2,10	3,67
1	2,81	1,52	1,44	2,22
2	1,69	0,78	0,58	0,53
4	0,44	0,03	0,05	0,24
6	0,10	0,13	0,19	0,48
8	0,22	0,18	0,26	0,69
10	0,08	0,21	0,28	0,68
12	0,00	0,02	0,24	0,67
14	0,00	0,00	0,00	0,36

Ejemplo de cálculo de sombras

Superficie de estudio ubicada en Madrid, inclinada 30° y orientada 10° al Sudeste.

Con un teodolito se mide la desviación (azimut) respecto del sur del perfil el obstáculo, así como la elevación del mismo, y se proyecta sobre la gráfica de trayectorias (áreas).

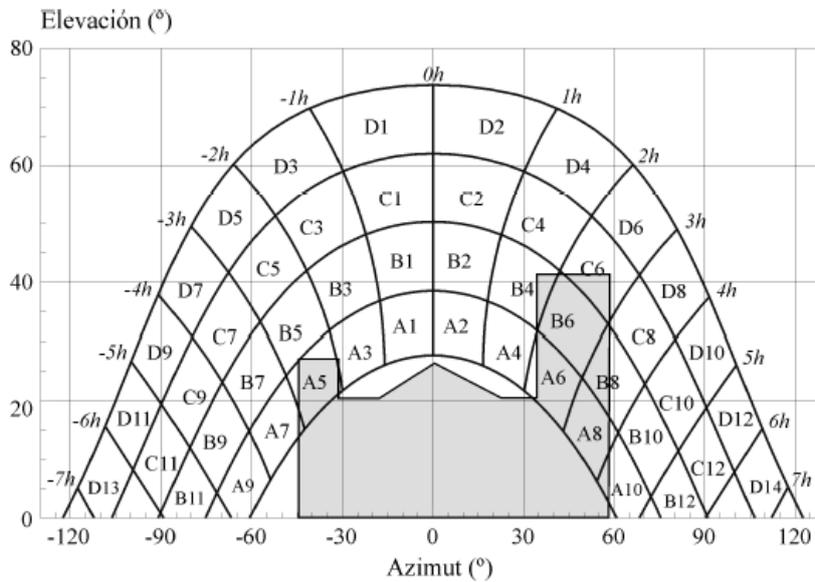


Figura 34: Trayectoria del sol anual, similar a la figura 33.

Una vez determinado el perfil sobre la gráfica de trayectorias se selecciona la tabla más próxima a la geometría (figura 35), marcando las zonas que se encuentran afectadas por la presencia del obstáculo:

$\beta = 35^\circ$ $\alpha = 0^\circ$	A	B	C	D
13	0	0	0	3
11	0	1	12	44
9	13	41	62	149
7	100	95	127	276
5	184	150	183	387
3	270	188	221	467
1	315	212	243	504
2	317	212	233	499
4	270	189	201	446
6	179	151	165	363
8	98	99	108	255
10	11	42	52	133
12	0	2	10	40
14	0	0	0	2

Figura 35: Tabla más próxima a la geometría, con indicaciones por la presencia del obstáculo.

Los cálculos finales necesitan aproximar el área cubierto de cada zona:

$$\begin{aligned}
 \text{Pérdidas por sombreado (\% de irradiación global incidente anual)} &= \\
 &= 0,25 \times B4 + 0,5 \times A5 + 0,75 \times A6 + B6 + 0,25 \times C6 + A8 + 0,5 \times B8 + 0,25 \times A10 = \\
 &= 0,25 \times 1,89 + 0,5 \times 1,84 + 0,75 \times 1,79 + 1,51 + 0,25 \times 1,65 + 0,98 + 0,5 \times 0,99 + 0,25 \times 0,11 = \\
 &= 6,16 \% \cdot 6 \%
 \end{aligned}$$

Para finalizar con el cálculo de sombras se presenta el método de cómo calcular la distancia mínima entre captadores, de manera que una fila no proyecte sombra sobre el resto.

Distancia mínima entre filas de captadores

La distancia d , medida sobre la horizontal, entre una fila de captadores y un obstáculo, de altura h , que pueda producir sombras sobre la instalación deberá garantizar un mínimo de 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno.

Esta distancia d será superior al valor obtenido por la expresión:

$$d = h / \tan (61^\circ - \text{latitud})$$

donde $1 / \tan (61^\circ - \text{latitud})$ es un coeficiente adimensional denominado k .

Algunos valores significativos de k se pueden ver en la figura 36 en función de la latitud del lugar.

Latitud	29°	37°	39°	41°	43°	45°
k	1,600	2,246	2,475	2,747	3,078	3,487

Figura 36: Valor de k en función de la latitud

En la figura 37 se muestran algunos ejemplos de cálculo, con los respectivos valores a medir de h (altura sobre la horizontal del colector que puede recibir la sombra) y d (distancia de separación del colector que puede recibir la sombra).

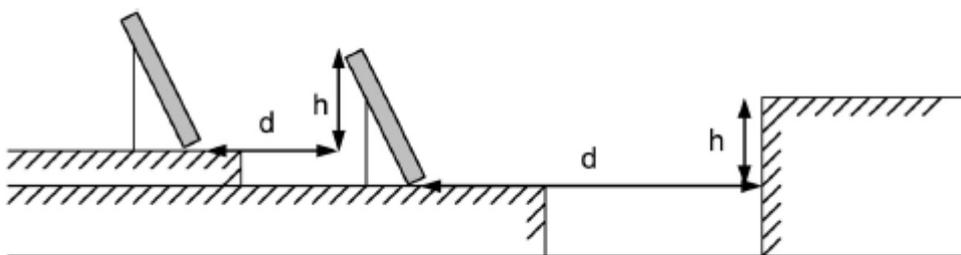


Figura 37: Ejemplo de cálculo de sombras.

Lógicamente la separación calculada es la más pequeña que se puede poner para evitar la proyección de sombras entre filas de colectores o con respecto a un obstáculo.

Capítulo 6. Desarrollo teórico del experimento.

En el capítulo 6 se va a describir y caracterizar dos cocinas solares de tipo Funnel.

En la figura 38 se muestran las dos cocinas objeto de estudio.



Figura 38: Cocinas solares tipo Funnel que se caracterizan en el presente proyecto.

Una cocina solar es un colector solar térmico, también conocido como captador solar térmico, es decir, es un tipo de panel solar encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía térmica.

Por lo tanto, el objetivo de este tipo de panel solar es realizar una transformación de energía, la irradiación solar que llega a los módulos solares es transformada en energía térmica. Algunos tipos de instalaciones solares térmicas utilizan este calor para producir vapor y gracias a este, generar electricidad, pero no es el objetivo de los colectores solares.

Es importante distinguir un colector solar térmico de los paneles fotovoltaicos, los paneles fotovoltaicos tienen la capacidad de transformar la irradiación solar directamente en electricidad en forma de corriente continua.

Desde un punto de vista físico, los captadores solares térmicos se rigen por las leyes de la termodinámica para realizar las transformaciones de energía mientras que los paneles fotovoltaicos no utilizan las leyes de la termodinámica para convertir la energía solar, sino que se trata de un proceso eléctrico.

6.1 Tipos de colectores solares térmicos

Los colectores solares térmicos se clasifican según el incremento de temperatura que deseamos obtener, de este modo, podemos clasificarlos en colectores de baja temperatura y colectores de alta temperatura.

1. Colectores de baja temperatura

Se considera que una aplicación solar es de baja temperatura cuando la temperatura máxima a la que llega el fluido es de 75°C-80°C.

Dentro de los colectores solares de baja temperatura tenemos varios tipos:

1.1 Colector solar térmico de placa plana.

También conocidos como panel solar térmico, básicamente consiste en una superficie plana atravesada por una tubería a través de la cual circula el fluido que se quiere calentar. En la figura 39 se muestran dos colectores solares térmicos de placa plana.



Figura 39: Colector solar térmico de placa plana

Los colectores solares planos pueden estar o no protegidos, el colector solar plano protegido cuenta con una lámina de vidrio fino que lo recubre superiormente de modo que limita las pérdidas de calor y aumenta el rendimiento debido al efecto invernadero.

En la figura 40 se muestra un esquema de un colector solar plano protegido por una cubierta de metacrilato.

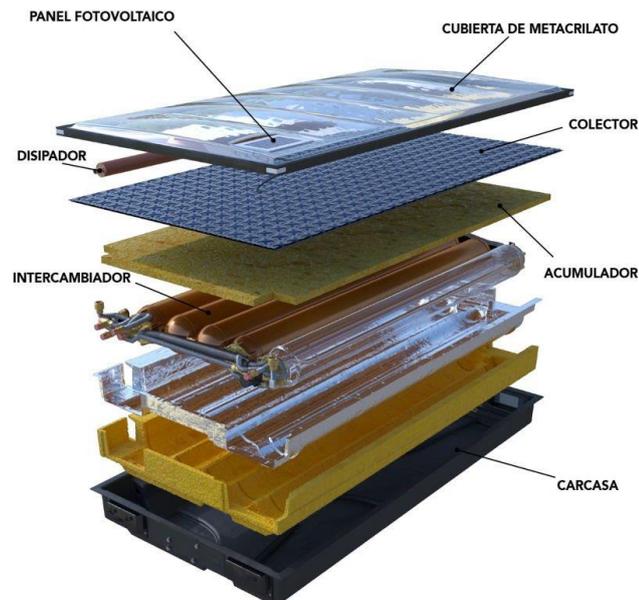


Figura 40: Colector solar de placas planas protegido

Los colectores solares no protegidos no tienen ningún vidrio o lamina superior que permita aprovechar el efecto invernadero por lo que su rendimiento es peor.

1.2 Colector solar térmico de tubos de vacío.

1.2.1 Colector solar de tubos de vacío

El funcionamiento de este tipo de colector solar es el mismo que el de el colector solar plano protegido, los tubos metálicos del colector plano son sustituidos por tubos de vidrio los tubos de vidrio están encapsulados, uno a uno, en otro tubo de vidrio de tal forma que entre los dos hay un vacío que permite el efecto invernadero.

La gran ventaja de los colectores solares de tubos de vacío es su alto rendimiento, también, una de sus ventajas es, en el caso de que uno de los tubos se estropeará, no se podría cambiar ese tubo de forma aislada y no sería necesario cambiar todo el panel como al contrario que en el caso de un colector de placa plana, como

inconveniente, los colectores de tubos de vacío son más caros que los de placa plana.

En la figura 41 se muestra un colector solar de tubos de vacío.



Figura 41: Colector solar de tubos de vacío.

1.2.2 Colector solar de tubos de vacío con cambio de fase.

Este tipo de colector solar aprovecha el cambio de fase de vapor a líquido dentro de cada tubo para entregar energía a un circuito secundario de fluido de transporte.

Los tubos que contienen el fluido son tubos cerrados que, al calentarse por el sol, alcanzan la temperatura necesaria para producir el cambio de fase de líquido a gas (Vaporización o Ebullición). Estos tubos son metálicos, generalmente de cobre.

El vapor generado sube a la parte superior donde hay un cabezal más ancho (zona de condensación). La parte exterior de la zona de condensación está en contacto con líquido transportador. Debido a que el líquido transportador está a una temperatura inferior al vapor del tubo capta el calor gracias a un proceso termodinámico de convección y provoca que el vapor se condense. El líquido condensado cae de nuevo en la parte baja del tubo para volver a empezar el ciclo.

El tubo de calor se cierra dentro de otro tubo de vidrio entre los que se hace el vacío para aislar y aumentar su rendimiento.

En la figura 42 se muestra un colector solar de tubos de vacío con cambio de fase.



Figura 42: Colector solar de tubos de vacío con cambio de fase.

En la figura 43 se muestra un esquema de un colector solar de tubos de vacío con cambio de fase

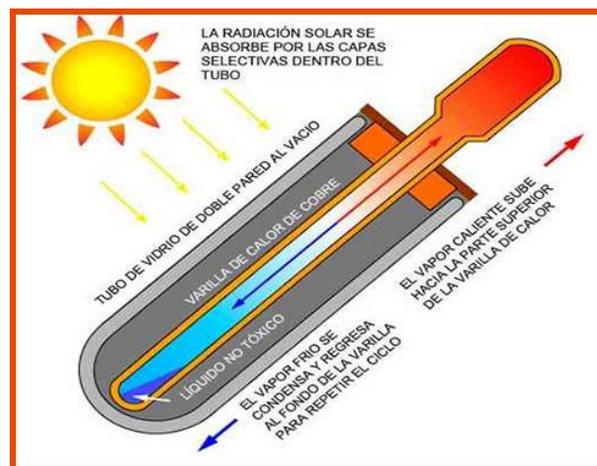


Figura 43: Esquema de colector solar de tubos de vacío con cambio de fase.

2. Colectores de alta temperatura.

También llamados colectores solares de concentración pueden alcanzar temperaturas muy elevadas del líquido en muy poco tiempo e incluso transformarlo a vapor y trabajar en este estado.

Estructuralmente están contruidos con campos de espejos planos que se orientan la irradiación solar que les llega sobre un determinado punto en el que colocaremos el fluido que deseamos calentar.

En la figura 44 se muestra un colector solar de alta temperatura.



Figura 44: Colector solar de alta temperatura.

6.2 Modelo experimental.

Como hemos visto en el capítulo anterior, una cocina solar es un colector solar de alta temperatura o colector solar de concentración.

En este proyecto se caracterizan dos cocinas solares, ambas son modelo *Funnel*, se llaman así ya que tienen forma de embudo.

En la figura 45 se muestra una cocina solar modelo *Funnel*, la pequeña de las dos que se van a caracterizar.



Figura 45: Cocina solar *Funnel* pequeña.

En la figura 46 se muestra una cocina solar modelo Funnel, la de mayores dimensiones de las dos que se van a caracterizar.



Figura 46: Cocina solar Funnel grande.

La construcción de la cocina solar de mayor tamaño se encuentra en el anexo 9.1

El sol será la única fuente energía que usaremos para cocinar, como consecuencia, no es necesario que haga calor para que podamos cocinar, podemos cocinar en la Antártida únicamente usando radiación solar, por el contrario, no podremos utilizar una cocina solar en días nublados o en la noche, ya que no hay radiación solar.

De esta forma orientaremos nuestra cocina hacia el sol, de tal forma que podamos captar la mayor parte de la radiación. En la figura 47 se muestra como debe ser la orientación de la cocina solar respecto del sol.



Figura 47: Correcta orientación de la cocina solar respecto del sol.

Una vez establecida la correcta orientación de nuestra cocina hacia el sol, necesitaremos absorber la mayor cantidad de energía solar que podamos, como hemos visto en apartados anteriores los materiales oscuros son los más convenientes para este fin.

En la figura 48 se muestra la captación de los rayos solares en una superficie negra y en una clara.



Figura 48: Captación de los rayos solares en función del color superficial del objeto.

Ahora que estamos absorbiendo la mayor cantidad de radiación solar que podemos, es muy importante minimizar las pérdidas, por ello el recipiente en el que cocinemos debe estar bien cerrado, por lo que el ajuste entre la tapa y el recipiente debe ser el óptimo para poder retener el calor creado dentro.

Así mismo, un efecto muy importante para conseguir atrapar la mayor cantidad de rayos solares es, como hemos comentado en otros apartados, el efecto invernadero, este principio se basa en envolver el recipiente que usaremos en un objeto transparente que permita pasar los rayos del sol sin dejar salir el calor que ya se ha generado dentro.

En la figura 49 se muestra un esquema de como cubrir una olla con una superficie transparente para aprovechar el efecto invernadero.

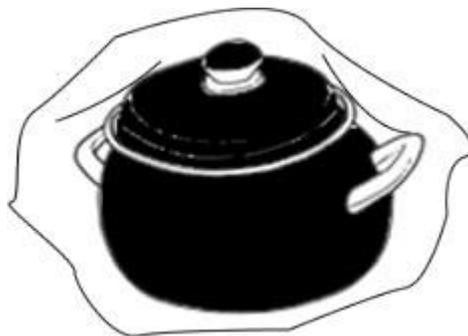


Figura 49: Efecto invernadero creado en una olla recubierta por una superficie transparente.

Ambas concinas solares se han construido siguiendo estas pautas, los recipientes para cocinar se han pintado de negro y se introducen en el interior de un recipiente de vidrio para aprovecharnos del efecto invernadero y mejorar el rendimiento de la cocina.

En la figura 50 se muestra el recipiente de cocción, y su cubierta, usado en las medidas experimentales.



Figura 50: Recipiente de cocción usado en las medidas experimentales de este proyecto.

6.3 Descripción de los aparatos de medida.

Para la obtención de datos experimentales y posterior caracterización de las cocinas, se ha utilizado la siguiente instrumentación:

Medida de temperatura: Para la medida de temperaturas se ha utilizado un “datalogger” con dos sondas de temperatura, una interna que utilizaremos para medir la temperatura ambiente, y una externa que introducimos en el interior del recipiente de cocción.

El instrumento utilizado es un *Testo 175T2*, la extracción de datos se realiza mediante un programa de mismo nombre, **Testo**.

«En la figura 51 se muestra el instrumento de medida de temperatura usado, *Testo 175T2*.



Figura 51: Equipo de medida Testo 175T2..

Medida de la potencia solar: Para conocer la cantidad de radiación solar que llega a la cocina, se ha utilizado un **piranómetro**, un piranómetro es un instrumento meteorológico que mide de forma muy precisa la radiación solar incidente, este sensor está diseñado para medir la densidad de flujo de radiación solar en (W/m^2), en un campo de 180 grados.

Para medir la radiación solar, se requiere que la respuesta al flujo de radiación varíe con el coseno del ángulo de incidencia.

El funcionamiento del piranómetro se basa en:

- Una termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 50000 nm. y tiene una respuesta casi perfecta al coseno del ángulo de incidencia.
- Una cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2800 nm. preservando un campo de visión de 180 grados. Otra función de la cúpula es la de proteger la termopila de la convección.
- Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proporcionando una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente.

Nuestro piranómetro se conecta a un “datalogger” modelo **Almemo 2390-5 AHLBORN**, a través del cual, y con ayuda del programa **AVR Tester V5**, podemos extraer las medidas de potencia solar por metro cuadrado que le llega a la cocina.

«En la figura 52 se muestra el piranómetro y el “datalogger”, Almemo 2390-5, usados para medir la potencia solar por metro cuadrado que llega a la cocina .



Figura 52: Piranómetro y “datalogger” usado para medir la potencia solar.

Medida de la masa de agua: La masa de agua contenida en el recipiente se mide con una báscula electrónica, modelo KERN 572, con una tolerancia de ± 0.01 g.

Para evitar incertidumbres entre los distintos tipos de recipiente que se pueden usar, el procedimiento de pesada ha sido:

1° Pesada del recipiente vacío y posterior puesta a “0g” de la báscula:

«En la figura 53 se muestra la báscula usada, con el recipiente de cocción, y un TARE a “0” para no tener en cuenta la masa del recipiente en la pesada del agua.»



Figura 53: Puesta a “0” de la báscula con el recipiente de cocción.

2° Una vez rellenado el recipiente, pesada de nuevo:

«En la figura 54 se muestra una medida de masa de agua sin tener en cuenta la masa del recipiente.»



Figura 54: Medida del recipiente de cocción lleno de agua, sin tener en cuenta la masa del recipiente.

Atendiendo a lo anterior, el esquema que usaremos para nuestro experimento será el siguiente:

«En la figura 55 se muestra el esquema seguido para caracterizar la cocina solar.»



Figura 55: Esquema completo utilizado en las medidas experimentales.

Capítulo 7. Análisis de los datos obtenidos.

En el presente capítulo se pretende caracterizar dos cocinas solares de distinto tamaño a partir de sus rectas de temperatura e intensidad solar recibida.

Primero se presentan dos medidas, una con cada cocina, en días prácticamente despejados, que consideramos como las medidas más representativas, y después se mostrarán las gráficas de otras dos medidas, una en el agua de cocción pasa a estado de vapor, y otra, un día nublado en el que no llegamos a la hervir el agua.

7.1 Caracterización cocina solar grande en un día despejado.

En la figura 56 se muestra las curvas de temperatura e intensidad solar recibida por la cocina grande en un día despejado.

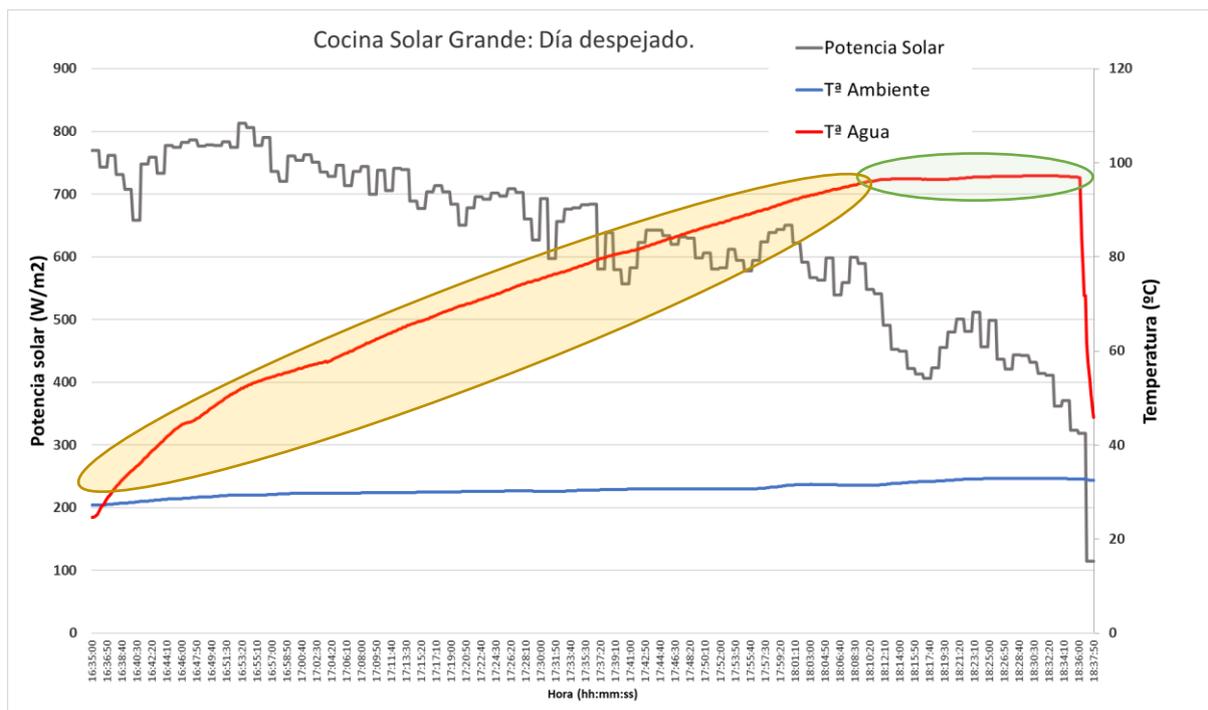


Figura 56: Curvas temperatura e intensidad solar en la cocina solar grande.

Donde:

- Señal roja: Medida sonda temperatura interna Temperatura, en °C, del agua situada en el interior del recipiente de cocción.
- Señal azul: Temperatura ambiente en °C.
- Señal gris: Medida piranómetro: Intensidad solar recibida por la cocina en W/m².

Podemos observar que la señal gris, medida de la intensidad de radiación solar, no es completamente lineal, ya que no era un día totalmente despejado, había presencia de cirrocúmulos dispersos que apenas interfieren en la radiación solar.

A través de la sonda de temperatura colocada en el interior del recipiente de cocción, señal roja, podemos observar un comportamiento lineal (zona sombreada en naranja) desde el comienzo del ensayo en el que tendremos una temperatura de agua mínima hasta que alcanzamos la temperatura máxima del agua en estado líquido. En esta zona calcularemos el calor útil que nos está proporcionando la cocina.

En la zona sombreada en color verde el agua se encuentra a su temperatura máxima en estado líquido, en caso de seguir aportando calor, el agua cambiaría de fase y obtendríamos vapor de agua.

Datos obtenidos en el experimento:

- Masa de agua (m): 0,492kg
- Temperatura inicial del agua (T_i): 24.60°C = 297,6K
- Temperatura final agua en estado líquido (T_f): 97.2°C = 370.20K
- Tiempo en alcanzar temperatura máxima agua líquida (t): 1:54min:10s = 6850s
- Calor específico del agua (c_e): 4180 $\frac{J}{kg \cdot K}$
- Calor útil obtenido: $Q_{\text{útil grande}} = m c_e (T_f - T_i) = 149306.256 \text{ J} = \mathbf{1.493 \cdot 10^5 \text{ J}}$
- Potencia útil obtenida: $P_{\text{útil grande}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{t} = \mathbf{21,796 \text{ W}}$
- Intensidad de radiación solar media recibida: 600,6 $\frac{W}{m^2}$

7.2 Caracterización cocina solar pequeña en un día despejado.

En la figura 57 se muestra las curvas de temperatura e intensidad solar recibida por la cocina pequeña en un día despejado.

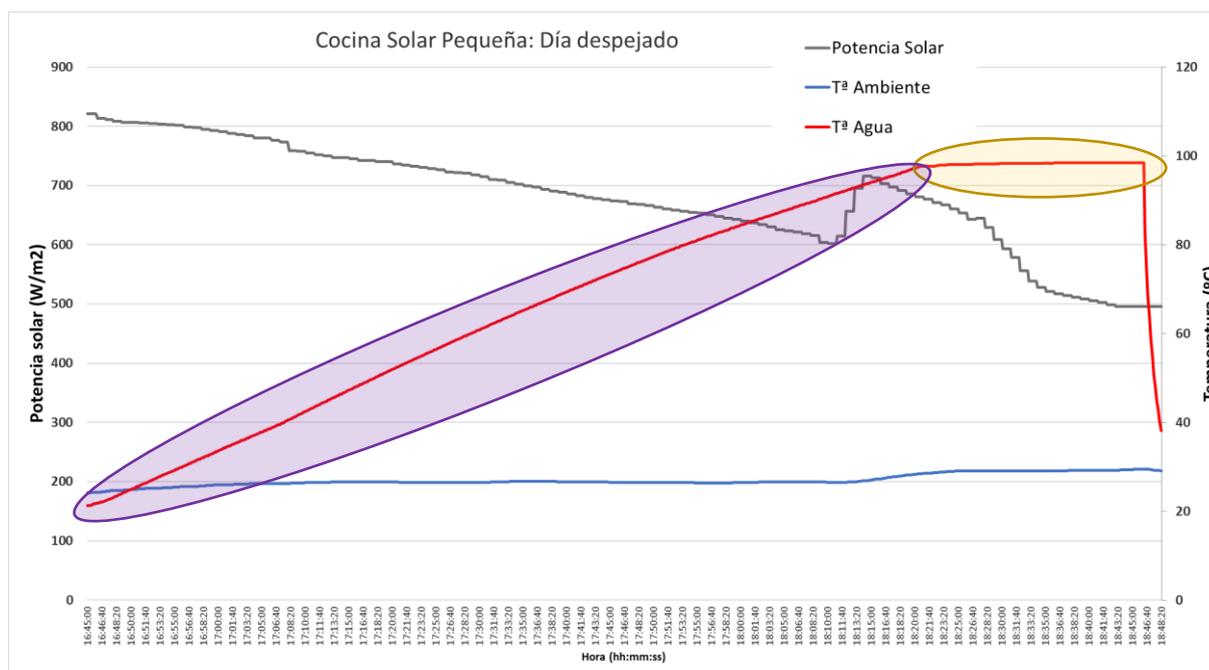


Figura 57: Curvas temperatura e intensidad solar en la cocina solar pequeña un día despejado.

Donde:

- Señal roja: Medida sonda temperatura interna Temperatura, en °C, del agua situada en el interior del recipiente de cocción.
- Señal azul: Temperatura ambiente en °C.
- Señal gris: Medida piranómetro: Intensidad solar recibida por la cocina en W/m^2

Podemos observar que la señal gris, medida de la intensidad de radiación solar, es prácticamente lineal, esto ocurre ya que la medida se tomó un día completamente despejado.

A través de la sonda de temperatura colocada en el interior del recipiente de cocción, señal roja, podemos observar un comportamiento lineal (zona sombreada en morado) desde el comienzo del ensayo en el que tendremos una temperatura de agua mínima hasta que alcanzamos la temperatura máxima del agua en estado líquido. En esta zona calcularemos el calor útil que nos está proporcionando la cocina.

En la zona sombreada en color amarillo el agua se encuentra a su temperatura máxima en estado líquido, en caso de seguir aportando calor, el agua cambiaría de fase y obtendríamos vapor de agua.

Datos obtenidos en el experimento:

- Masa de agua (m): 0,476kg
- Temperatura inicial del agua (T_i): $21.3^{\circ}\text{C} = 294,3\text{K}$
- Temperatura final agua en estado líquido (T_f): $98.4^{\circ}\text{C} = 371.4\text{K}$
- Tiempo en alcanzar temperatura máxima agua líquida (t): 1:54min:10s = 6600s
- Calor específico del agua (c_e): $4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- Calor útil obtenido: $Q_{\text{útil pequeña}} = m c_e (T_f - T_i) = 153452,67 \text{ J} = \mathbf{1.534 \cdot 10^5 \text{ J}}$
- Potencia útil obtenida: $P_{\text{útil pequeña}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{t} = \mathbf{23,25 \text{ W}}$
- Intensidad de radiación solar media recibida: $675,61 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

En la siguiente tabla (figura 58) podemos ver una comparación de los principales datos de interés obtenidos en los experimentos desarrollados con ambas cocinas:

		Cocina grande	Cocina pequeña
Masa de agua	kg	0.492	0.476
Temperatura inicial agua	$^{\circ}\text{C}$	24.6	21.3
Temperatura final agua	$^{\circ}\text{C}$	97.2	98.4
Tiempo	s	6850	6600
Calor específico agua	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	4180	4180
Intensidad de radiación solar media recibida	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	600.6	675.61
Calor útil obtenido	J	149306.256	153404.328
Potencia útil obtenida	W	21.797	23.243

Figura 58: Tabla comparativa de las dos cocinas solares modelo Funnel.

Observamos que el calor útil obtenido es prácticamente igual en ambas cocinas, la teoría nos indica que a mayor superficie de absorción mayor calor útil obtendríamos, eso es cierto, pero es cierto para una cantidad radiación incidente igual, en nuestros ensayos vemos que la cocina pequeña recibe una intensidad de radiación mayor lo que aumenta su calor obtenido.

7.3 Otras medidas experimentales.

7.3.1 Presencia de ebullición en la cocina solar grande.

En la figura 59 se muestran las curvas de temperatura e intensidad solar recibida por la cocina grande en un experimento en el que alcanzamos el cambio de fase del agua líquida a vapor de agua.

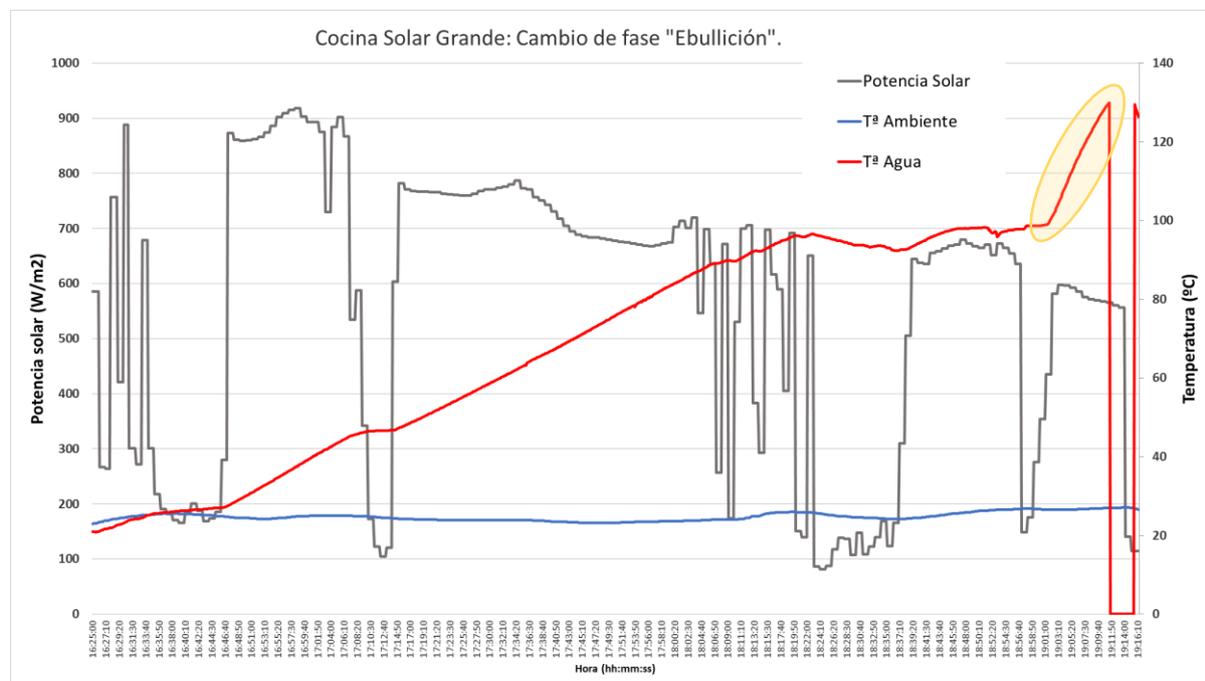


Figura 59: Curvas temperatura e intensidad solar en la cocina solar grande.

Donde:

- Señal roja: Medida sonda temperatura interna Temperatura, en °C, del agua situada en el interior del recipiente de cocción.
- Señal azul: Temperatura ambiente en °C.
- Señal gris: Medida piranómetro: Intensidad solar recibida por la cocina en W/m^2

Podemos observar que la señal del piranómetro (señal gris) no tiene una tendencia lineal decreciente, sino que tiene variaciones muy altas, esto es debido a la presencia de nubes dispersas, cuando el sol se esconde detrás de las nubes la intensidad de radiación recibida es muy baja, por el contrario, cuando el cielo se encuentra despejado la radiación recibida es máxima.

El comportamiento de la sonda de temperatura situada en el interior del recipiente de cocción, señal roja, es similar al mostrado en las figuras 57 y 58 anteriores, sin embargo, en este experimento en lugar de finalizar el ensayo cuando la temperatura de agua líquida alcanza su máximo, hemos dejado la cocina expuesta a la radiación solar buscando de esta forma provocar la **ebullición** del agua y producir **vapor de agua**, esto lo podemos ver en la **zona sombreada de amarillo**.

Datos del experimento:

- Masa de agua (m): 0,462kg
- Temperatura inicial del agua (T_i): 20.8°C = 293,8K
- Temperatura final agua en estado líquido (T_f): 96.5°C = 369.5K
- Tiempo en alcanzar la temperatura máxima de agua líquida (t): 2:51min:20s = 10280s
- Calor específico del agua (c_e): $4180 \frac{J}{kg \cdot K}$
- Calor útil obtenido: $Q_{\text{útil grande}} = m c_e (T_f - T_i) = 146188,812 \text{ J} = \mathbf{1.461 \cdot 10^5 \text{ J}}$
- Potencia útil obtenida: $P_{\text{útil grande}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{t} = \mathbf{14,22 \text{ W}}$
- Intensidad de radiación solar media recibida: $503,628 \frac{W}{m^2}$

7.3. Adquisición de datos en un día nublado.

En la figura 60 se muestra las curvas de temperatura e intensidad solar recibida por la cocina pequeña en un día con la presencia de muchas nubes.

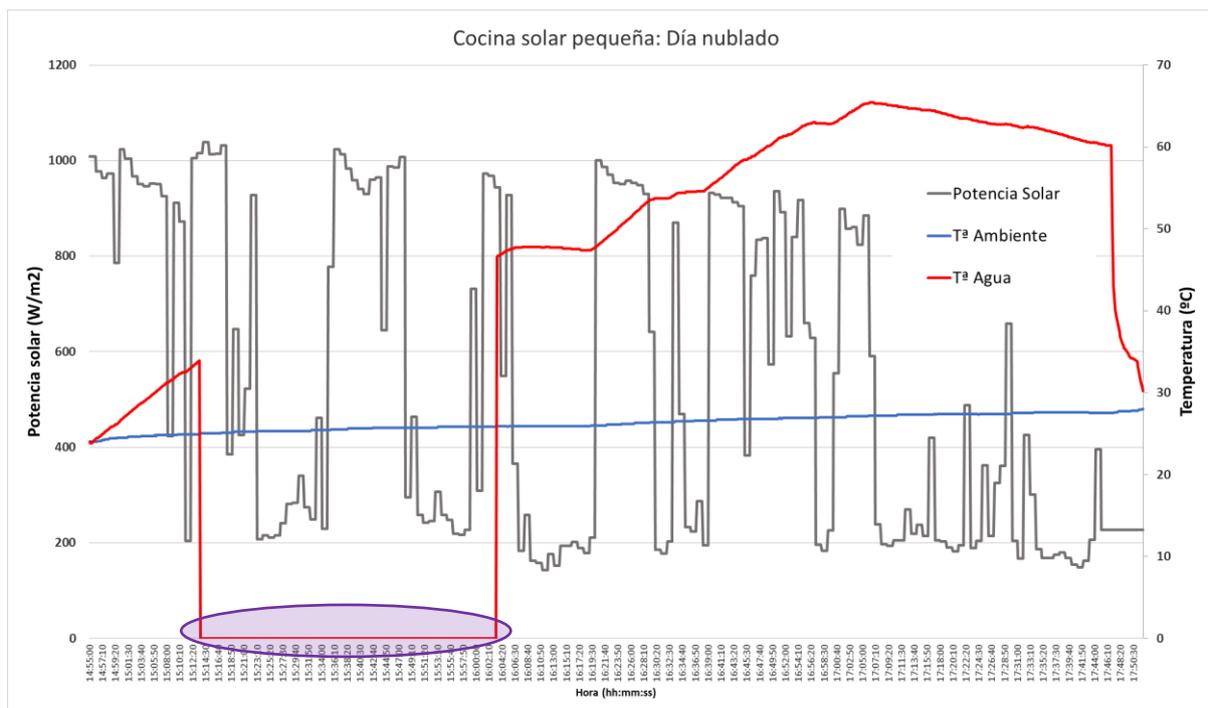


Figura 60: Curvas temperatura e intensidad solar en la cocina solar pequeña en un día nublado.

Donde:

- Señal roja: Medida sonda temperatura interna Temperatura, en °C, del agua situada en el interior del recipiente de cocción.
- Señal azul: Temperatura ambiente en °C.
- Señal gris: Medida piranómetro: Intensidad solar recibida por la cocina en W/m^2

A través de la señal gris, señal del piranómetro, podemos observar que ha habido una interrupción en la llegada de radiación solar, esto se ha producido debido a la presencia de abundantes nubes. Debido a ello, no hemos podido alcanzar una temperatura de agua elevada (señal roja).

A parte de esto, en la zona delimitada en morado, podemos observar un problema en la adquisición de la temperatura interna del agua debido a un fallo en el data logger.

Datos del experimento:

- Masa de agua (m): 0,491kg
- Temperatura inicial del agua (T_i): $23.8^{\circ}\text{C} = 296,8\text{K}$
- Temperatura final agua en estado líquido (T_f): $63^{\circ}\text{C} = 336\text{K}$
- Tiempo en alcanzar la temperatura máxima de agua líquida (t): 2:25min:00s = 8700s
- Calor específico del agua (c_e): $4180 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Calor útil obtenido: $Q_{\text{útil grande}} = m c_e (T_f - T_i) = 80453,296 \text{ J} = \mathbf{8,045*10^4\text{J}}$
- Potencia útil obtenida: $P_{\text{útil grande}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{t} = \mathbf{9,247 \text{ W}}$
- Intensidad de radiación solar media recibida: $470.069 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Vemos como la intensidad de radiación recibida en un día nublado es significativamente más baja que en un día despejado ($675 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$), lo que no nos permitiría cocinar alimentos.

Capítulo 8. Conclusiones y trabajos futuros.

Se demuestra que es posible alcanzar temperaturas de ebullición del agua que permitirían la cocción de alimentos, potabilización del agua, esterilización...y

También se ha demostrado que una cocina solar es un invento sencillo, muy económico y que cuenta con numerosas ventajas.

¿Qué ventajas presenta una cocina solar?

- La única fuente de energía necesaria para la cocción es el Sol, y se trata de una fuente de energía limpia, renovable y gratis.
- Su construcción es muy sencilla y económica: Estructuralmente tienen una base rígida, puede ser cartón, que se recubre por un tamiz capaz de reflejar la luz solar, por ejemplo, el papel de aluminio, que refleja más de un 90% de la radiación visible. (wordpress s.f.)
- Son muy ligeras y de fácil transporte.
- Las cocinas solares cocinan entre (80-120) °C, lo que es ideal para retener los nutrientes y el sabor de los alimentos, además de que no se queman.
- No existe fuego que pueda ocasionar incendios.
- No hay humo que pueda producir contaminación y enfermedades.
- Mejoran la calidad del aire a nivel global, el uso de combustibles tradicionales como la madera o el gas genera humos que contaminan el aire y contribuyen al calentamiento global

Es decir, las cocinas solares son más seguras, saludables, versátiles, adaptables y limpias que las cocinas tradicionales.

No todo son ventajas, el principal inconveniente de las cocinas solares, obviamente es que dependemos del sol para poder cocinar. No es posible cocinar en días nublados o en la noche.

Otro de los inconvenientes que se ha encontrado con las dos cocinas expuestas en este proyecto, en mayor medida con la cocina grande, es que, si no tienes una base para la cocina o la estructura de la cocina no es lo suficientemente rígida, al ser superficies muy amplias, estas pueden volcar a causa del viento. Esto se puede solucionar como en nuestro caso, con unos tirantes en las direcciones adecuadas sujetos a superficies inmóviles.

Como trabajo futuro, cabe destacar, que este proyecto solo ha usado las cocinas solares como medio para la cocción, pero ¿Sería posible freír alimentos o cocinarlos en una plancha metálica?

Las pérdidas en ese caso serían mucho mayores al no contar con un recipiente externo que permita beneficiarnos del efecto invernadero, pero si se aumentan las dimensiones,

y por tanto la capacidad de captar radiación, de la cocina solar sería interesante hacer el estudio de la cocina solar como método para freír alimentos.

Capítulo 9. Anexos

9.1 Construcción cocina solar grande.

La cocina solar pequeña ya se encontraba construida y disponible en el laboratorio de transmisión de calor, a través de este proyecto se ha caracterizado.

La cocina solar grande se ha construido para este proyecto.

Las medidas usadas en la cocina solar grande son las que se muestran en la figura (figura 61).

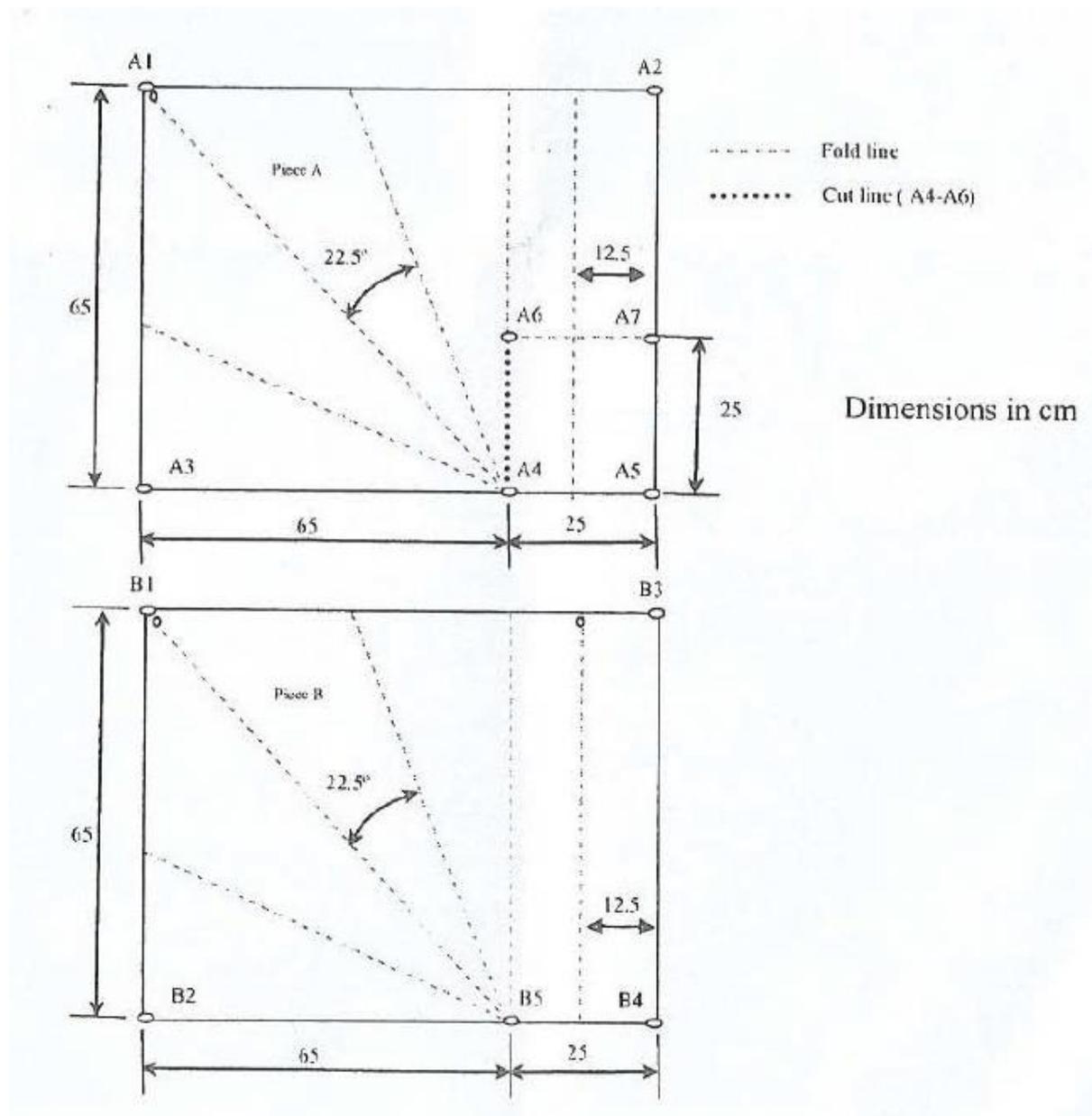


Figura 61: Medidas cocina solar grande.

Las figuras 62 y 63 muestran el proceso de construcción de la cocina solar grande.

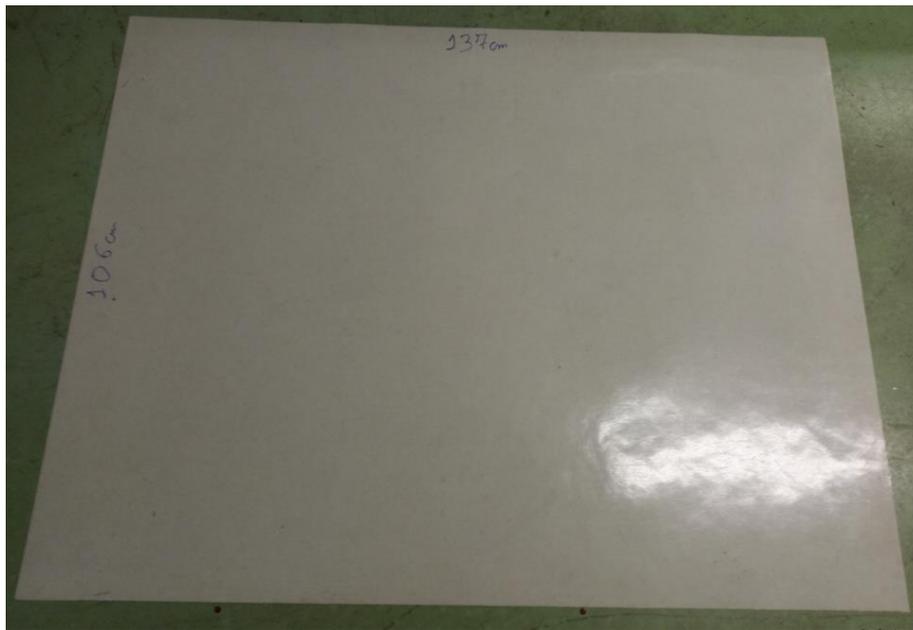


Figura 62: Lámina plástica flexible usada para la construcción de la cocina solar grande.

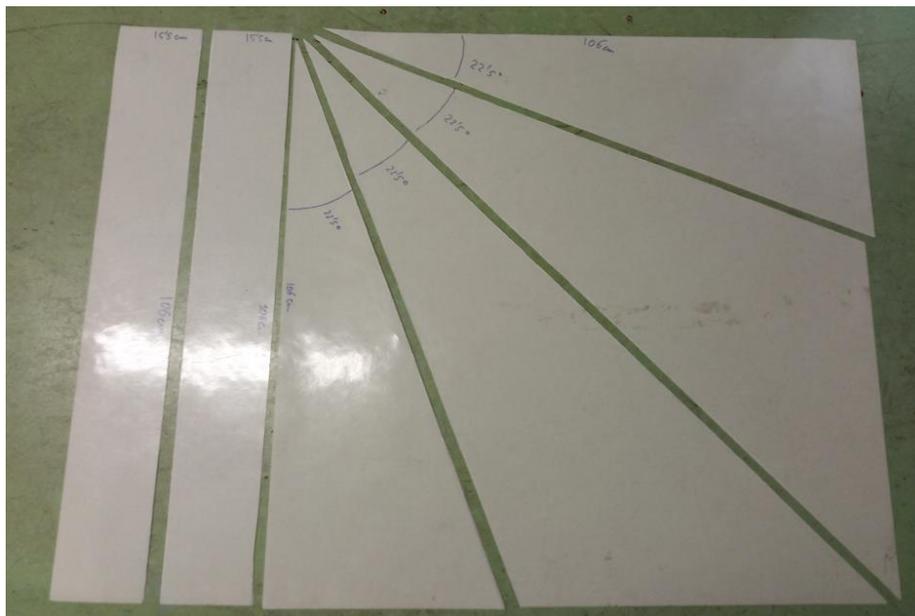


Figura 63: Lámina plástica recortada según las medidas indicadas en la figura 61.

En la figura 64 se muestran ambas cocinas solares una vez construidas.

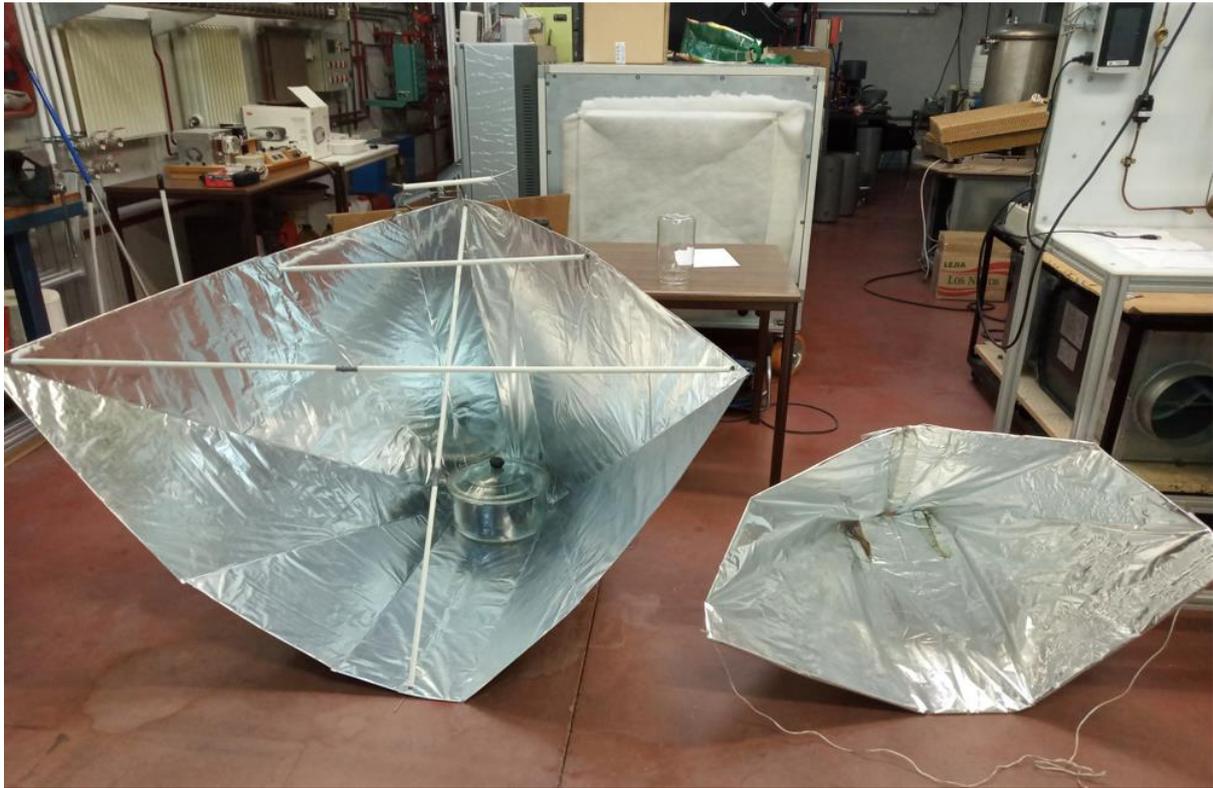


Figura 64: A la izquierda de la imagen: Cocina solar modelo Funnel construida para este proyecto. A la derecha: Cocina solar Funnel disponible en el laboratorio de transmisión de calor.

Capítulo 10. Bibliografía.

- Agency, International Energy. 2013.
- energía, Web: Fuentes de. s.f. <https://stem.guide/topic/fuentes-de-energia-primaria-y-secundaria/?lang=es>.
- Garg, Solar Cookers. «Solar Cookers.» 1987.
- *Imagen* *web.* s.f. <https://www.google.es/search?q=porcentaje+de+carboxihemoglobina+muerde&source>.
- «International Energy Agency.» 2006.
- Kariherb, Jettera &. 2009.
- NASA. «Haiti deforestation.» s.f.
- Steve Evans, "Mozambique - firewood collector". s.f.
- wordpress, Cocina solar. s.f. <https://cocinasolar.wordpress.com/2009/10/07/materiales-reflectantes-para-tus-cocinas-y-hornos-solares>.