

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ESPOL

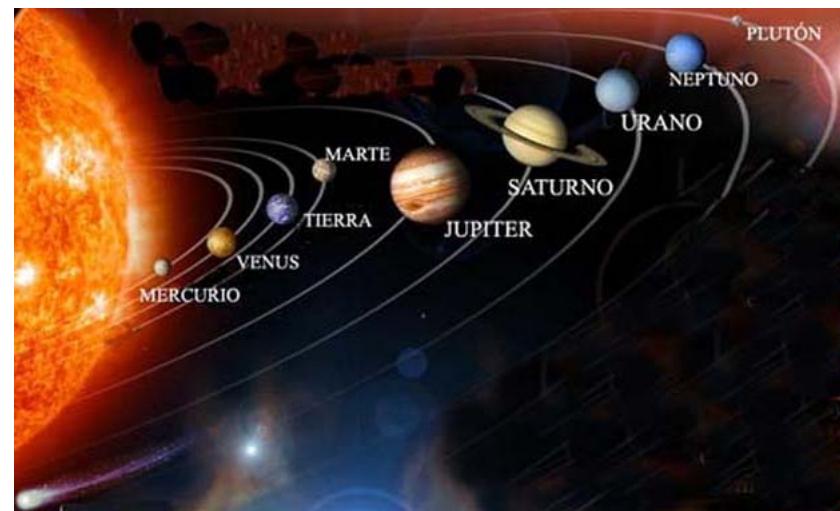
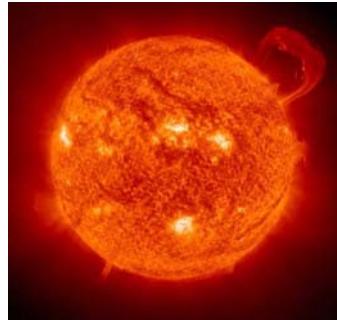
“ENERGÍA SOLAR TERMICA”

PROFESOR: ING. MSC. DOUGLAS AGUIRRE H.

2009

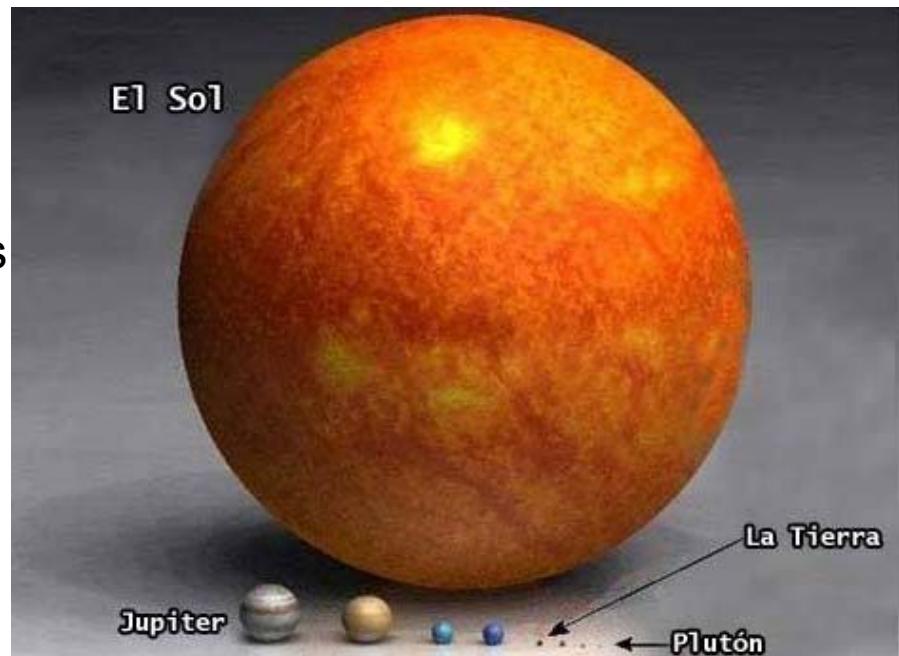
INTRODUCCIÓN

- La energía solar está garantizada para los próximos 6000 millones de años próximos años
- La energía solar es una fuente energética gratuita, limpia e inagotable gratuita, inagotable
- Durante 1 año, el Sol arroja sobre la Tierra 4000 veces más energía que la que se va a consumir
- EEUU recibe del Sol en 1 año, 1500 veces más energía que la que va a consumir.



Distancia Sol - Tierra

- Sol → esfera gaseosa, diámetro=1.391.000 km
- Distancia media Sol-Tierra: $r_o=1 = 1,496 \cdot 10^8$ km = 1 AU
AU = Distancia astronómica
- Dimensiones:
 - ✓ Sol = Balón fútbol
 - ✓ Tierra = Grano de arena
 - ✓ Distancia Sol-Tierra: 25 metros

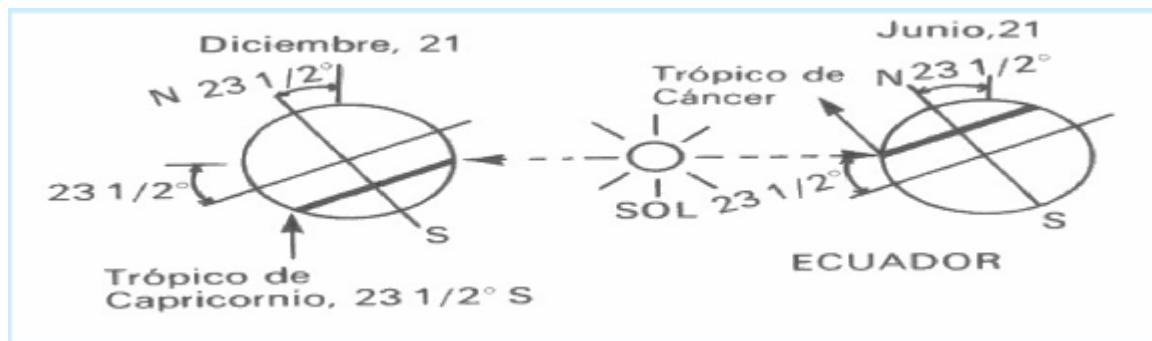


ESTACIONES

- **Hemisferio SUR:**
 - Solsticio de invierno (21 Junio): día más corto
 - Solsticio de verano (21 de Diciembre): día más largo
 - Equinoccio de otoño (20 de Marzo): día=noche (paso de verano a otoño)
 - Equinoccio de primavera (22 de Septiembre): día=noche (paso de invierno a primavera)
- **Hemisferio NORTE:**
 - Solsticio de verano (21 Junio): día más largo
 - Solsticio de invierno (21 de Diciembre): día más corto
 - Equinoccio de primavera (20 de Marzo): día=noche (paso de invierno a primavera)
 - Equinoccio de otoño (22 de Septiembre): día=noche (paso de verano a otoño)
- Invierno en Hemisferio Norte → mínima distancia sol-tierra → ¿máxima radiación en superficie terrestre?

NO → Motivo → ángulo de inclinación del eje de la Tierra= $23,5^{\circ}$ → estaciones del año estaciones año

ESTACIONES



Trópico de Cáncer Trópico de Cáncer:

Círculo terrestre de latitud $23,5^{\circ}\text{N}$, en donde el 21 de junio (solsticio de verano en el hemisferio N), los rayos solares a mediodía caen verticalmente sobre un observador del lugar

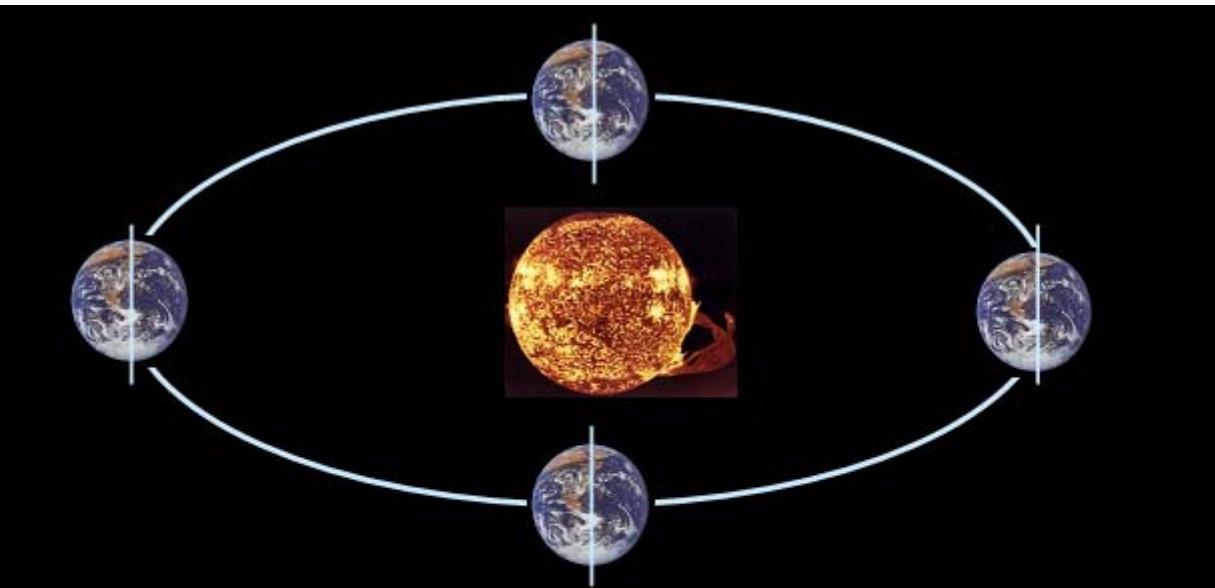
Trópico de Capricornio:

Círculo terrestre de latitud $23,5^{\circ}\text{S}$, en donde el 21 de diciembre (solsticio de invierno en el hemisferio N), los rayos solares a mediodía caen verticalmente sobre un observador del lugar.

ESTACIONES



ESTACIONES



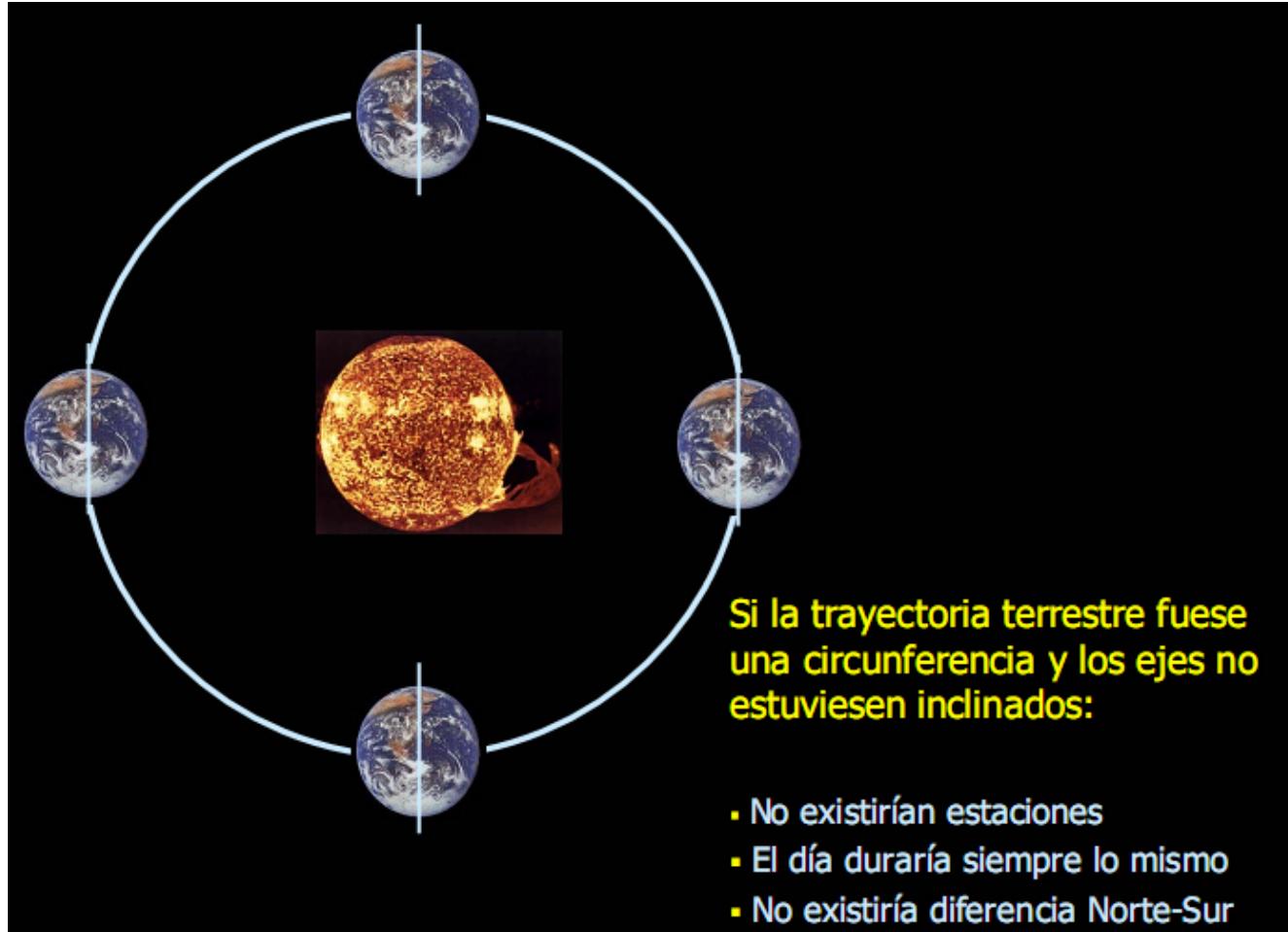
La trayectoria terrestre es elíptica y los ejes no están inclinados:

- Existirían 2 "estaciones" una de más calor y otra de menos.
- El día duraría siempre lo mismo
- No existiría diferencia Norte-Sur

ESTACIONES



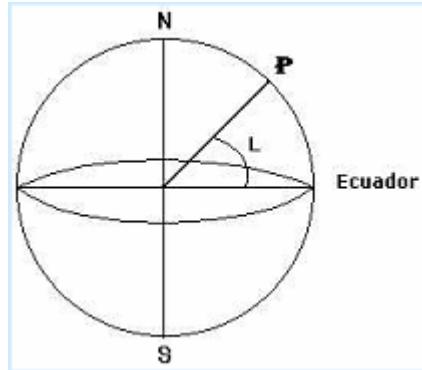
ESTACIONES



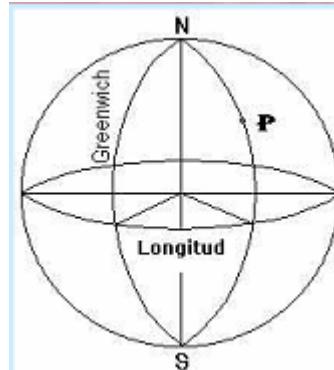
Si la trayectoria terrestre fuese una circunferencia y los ejes no estuviesen inclinados:

- No existirían estaciones
- El día duraría siempre lo mismo
- No existiría diferencia Norte-Sur

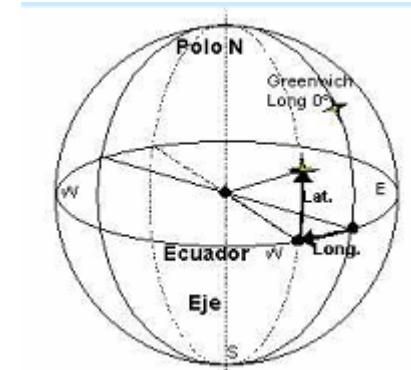
Posición del Sol Relativa a una Superficie



Latitud



Longitud



Latitud (L): Ángulo que forma el radio terrestre que pasa por el punto de la superficie terrestre considerado respecto al ecuador => + H.Norte; - H. Sur

Longitud: Ángulo que forma el meridiano que pasa por el punto de la superficie terrestre considerado respecto el meridiano de Greenwich => + Este; - Oeste

DECLINACIÓN SOLAR

Movimientos de la Tierra:

- Traslación: La Tierra gira en un plano de revolución eclíptico, dando una vuelta completa cada 365 días.
- Rotación: La Tierra gira alrededor del eje polar, dando una vuelta completa cada 24 horas.
- Declinación

Declinación → Ángulo formado entre el rayo solar con el plano del ecuador en cada época del año (δ)

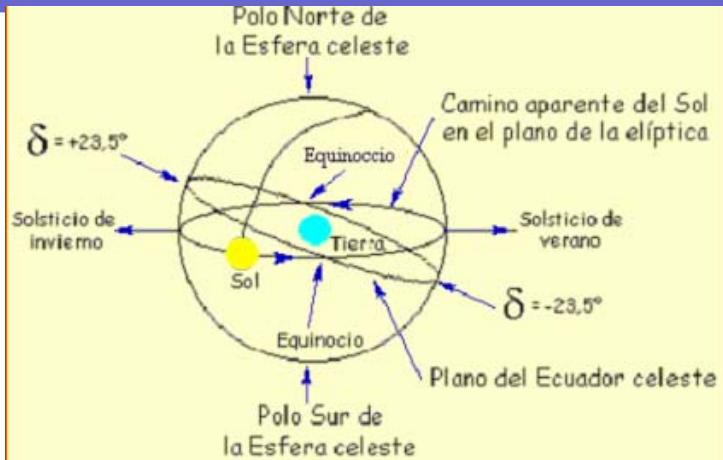
– Hemisferio Norte:

Solsticio de Verano: $\delta = 23,5^\circ$

Solsticio de Invierno: $\delta = -23,5^\circ$

Equinoccios: $\delta = 0^\circ$

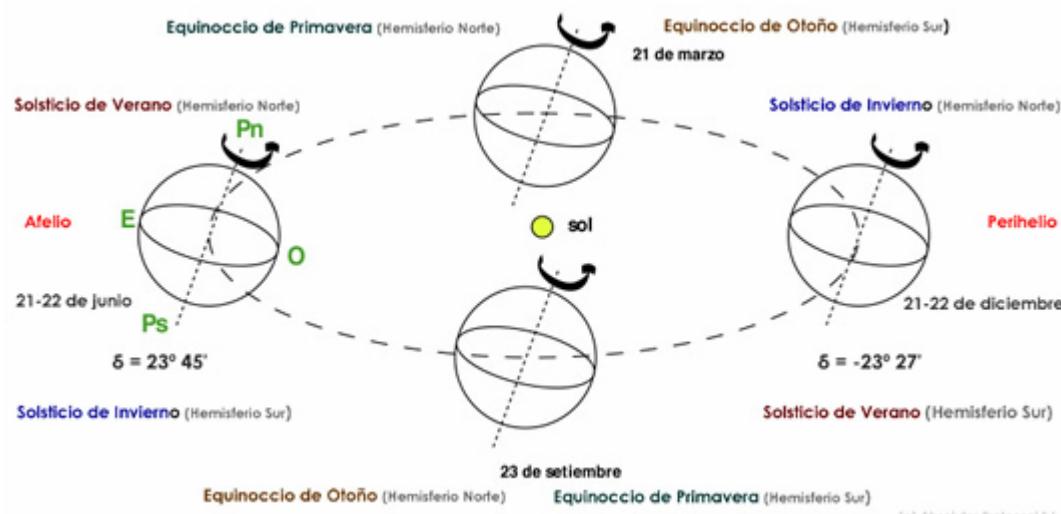
DECLINACIÓN SOLAR



$$\delta = 23.45 * \operatorname{sen} \left(\frac{360 * (284 + n)}{365} \right)$$

Siendo:

δ : Declinación Solar [grados]
n : Número del día de 1 a 365

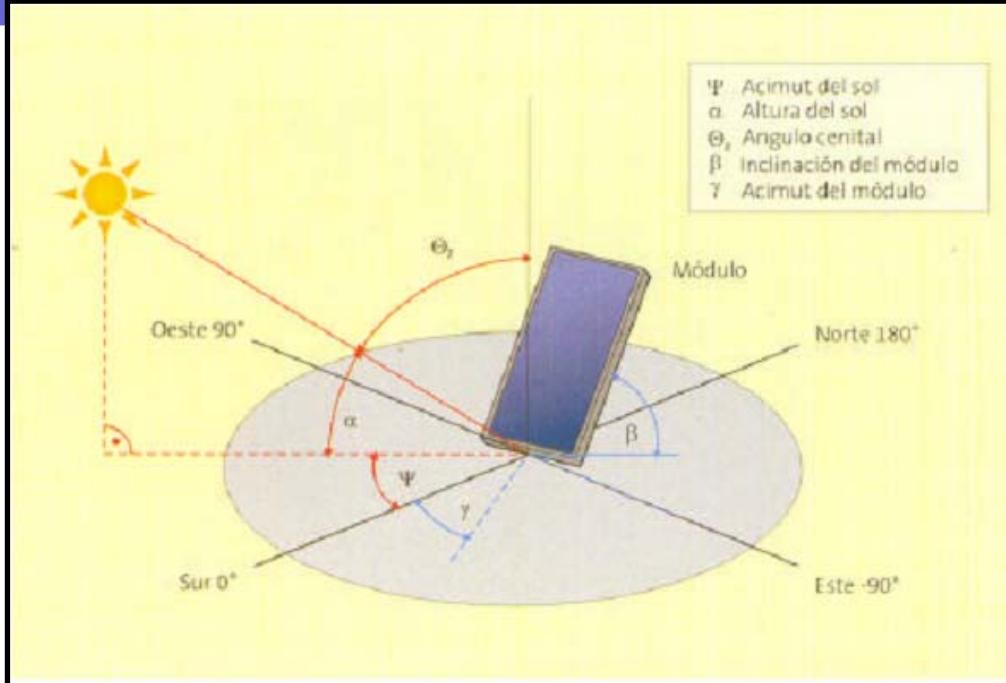


$$\alpha = 90 - \text{Latitud} - \delta$$

Siendo:

α : Altura Solar [grados]
Latitud: Latitud del proyecto [grados]

DECLINACIÓN SOLAR

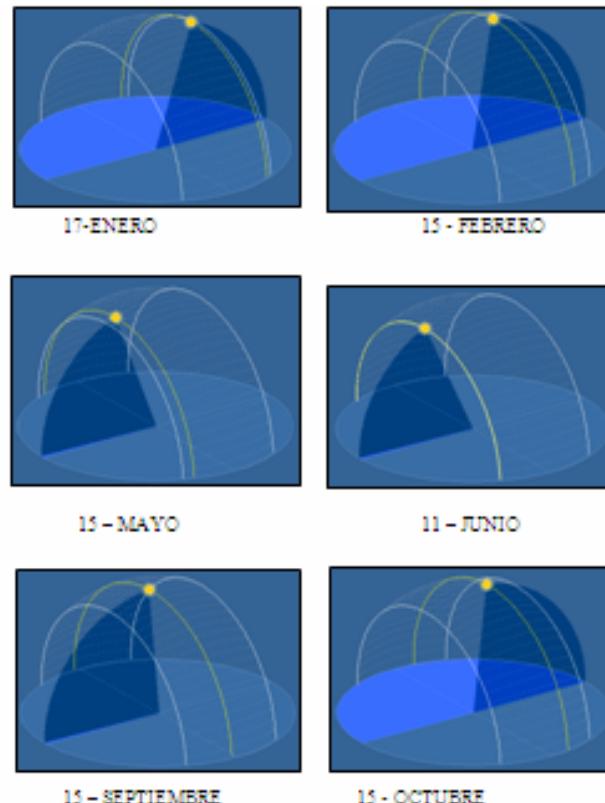
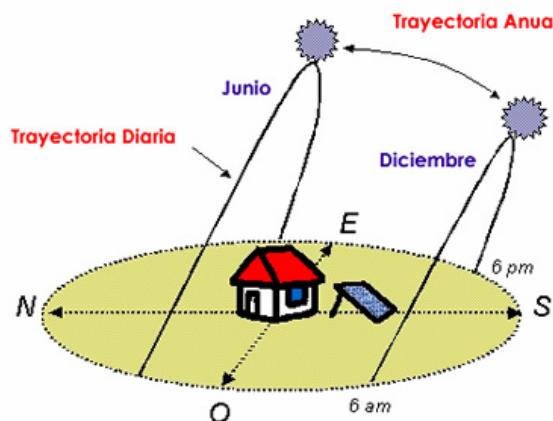


Azimut (Ψ)	Angulo de inclinación del Sol proyectado a la Superficie con respecto a la línea Norte-Sur [grados]
Azimut (γ)	Angulo de inclinación del módulo proyectado a la Superficie con respecto a la línea Norte-Sur [grados]
Inclinación (β)	Angulo que forma el módulo con respecto a la horizontal [grados]
Angulo Cenital (Φ_z)	Angulo de los rayos solares con respecto a la vertical [grados]
Altura Solar (α)	Angulo de los rayos solares con respecto a la Horizontal [grados]

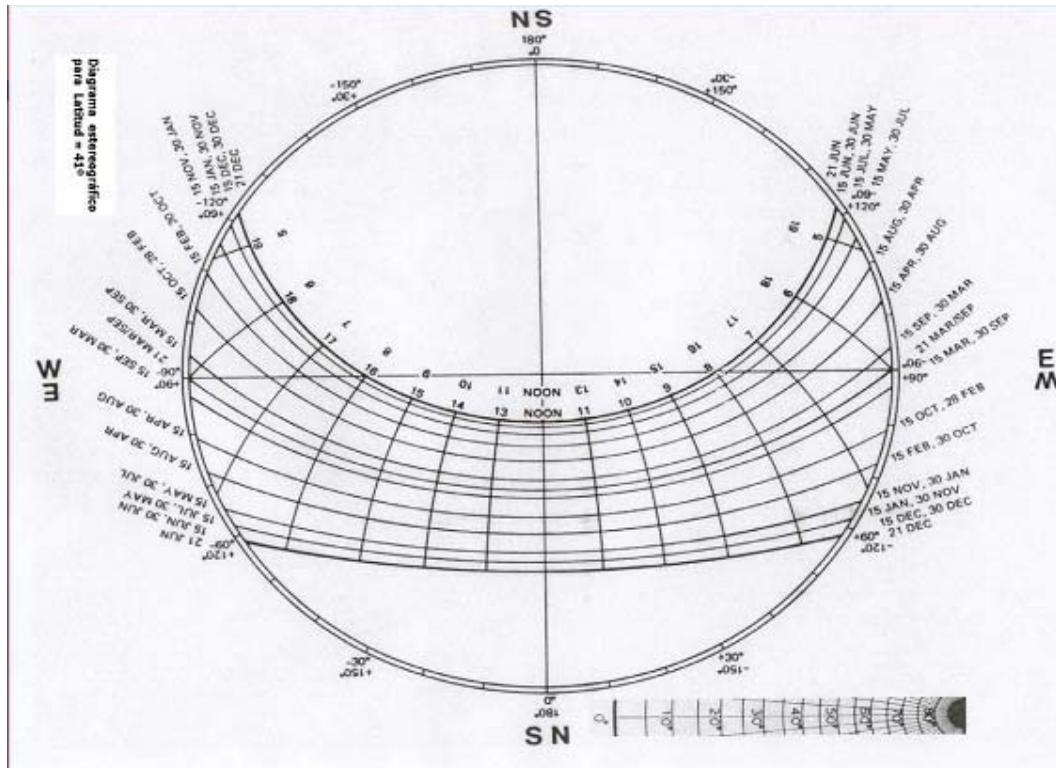
DECLINACIÓN SOLAR

Día (n)	Fecha del calendario	Declinación Solar (δ)	Altura Solar (a)
17	17 - ENERO	-20.92	113.12
47	16 - FEBRERO	-12.95	105.15
75	16 - MARZO	-2.42	94.62
105	15 - ABRIL	9.41	82.79
135	15 - MAYO	18.79	73.41
162	11 - JUNIO	23.09	69.11
198	17 - JULIO	21.18	71.02
228	16 - AGOSTO	13.45	78.75
258	15 - SEPTIEMBRE	2.22	89.98
288	15 - OCTUBRE	-9.60	101.80
318	14 - NOVIEMBRE	-18.91	111.11
344	10 - DICIEMBRE	-23.05	115.25

Declinación Solar en Guayaquil



CARTA SOLAR O ESTEREOGRAFICA / DIAGRAMAS SOLARES



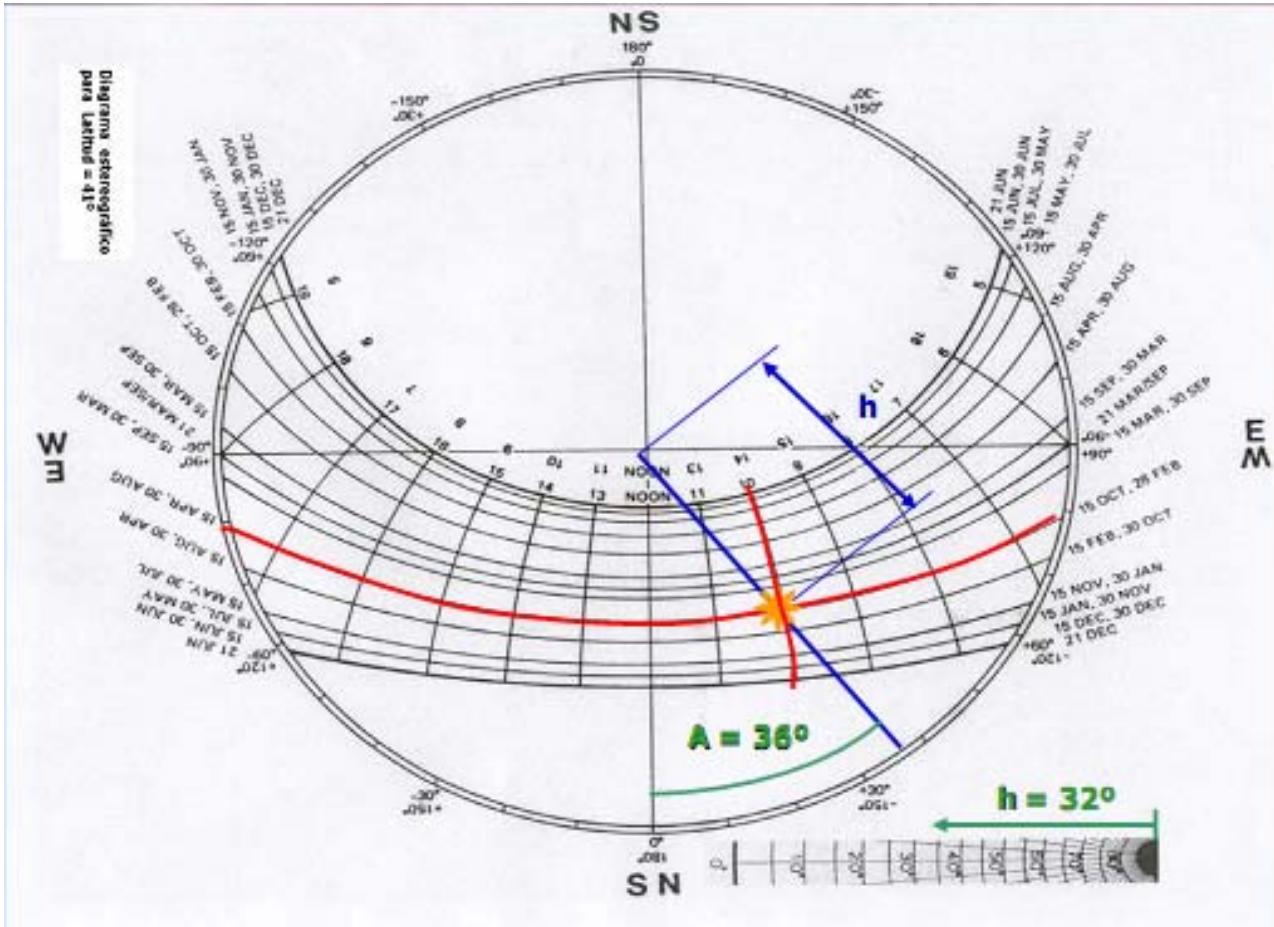
Para cada latitud hay que trabajar con un diagrama distinto

- Datos: Latitud, fecha(mes y día), hora
- Resultados: Altura solar, acimut

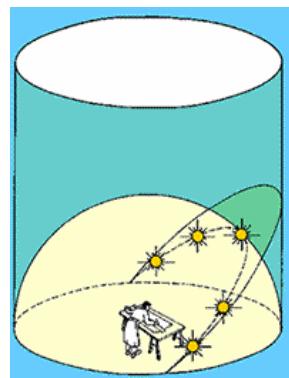
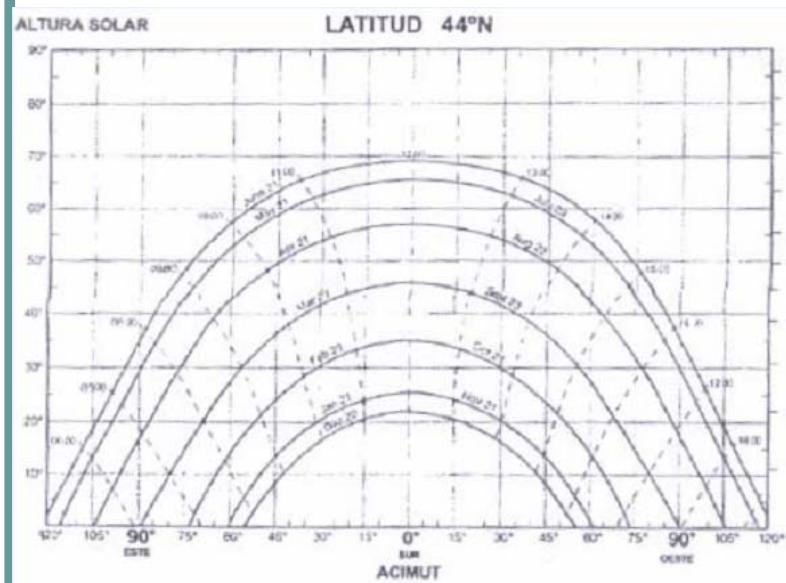
CARTA SOLAR O ESTEREOGRAFICA / DIAGRAMAS SOLARES

→ Ejemplo: Determinar el acimut y altura solar para Zaragoza el 15 de octubre a las 10:00 horas.

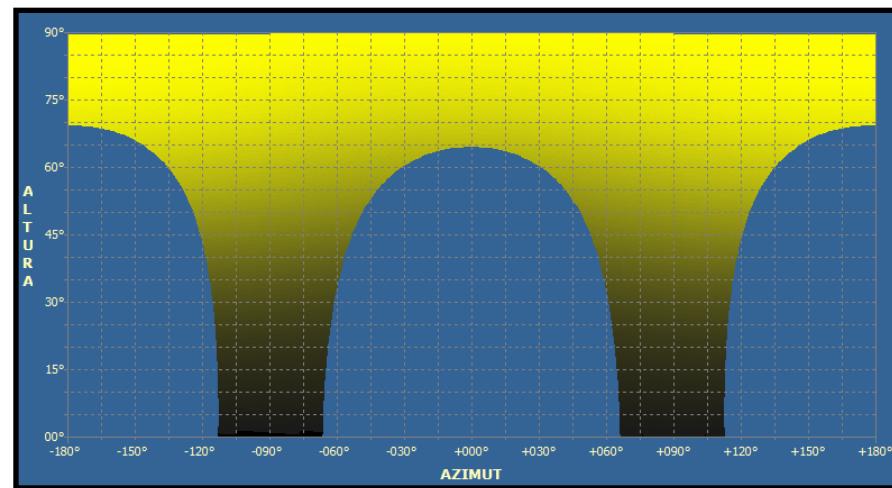
CARTA SOLAR O ESTEREOGRAFICA / DIAGRAMAS SOLARES



CARTA SOLAR CILINDRICA



LATIDUD -2° N



RADIACIÓN SOLAR

■ Irradiancia solar (I)

Energía incidente por unidad de tiempo (potencia) sobre la unidad de superficie (W/m^2).

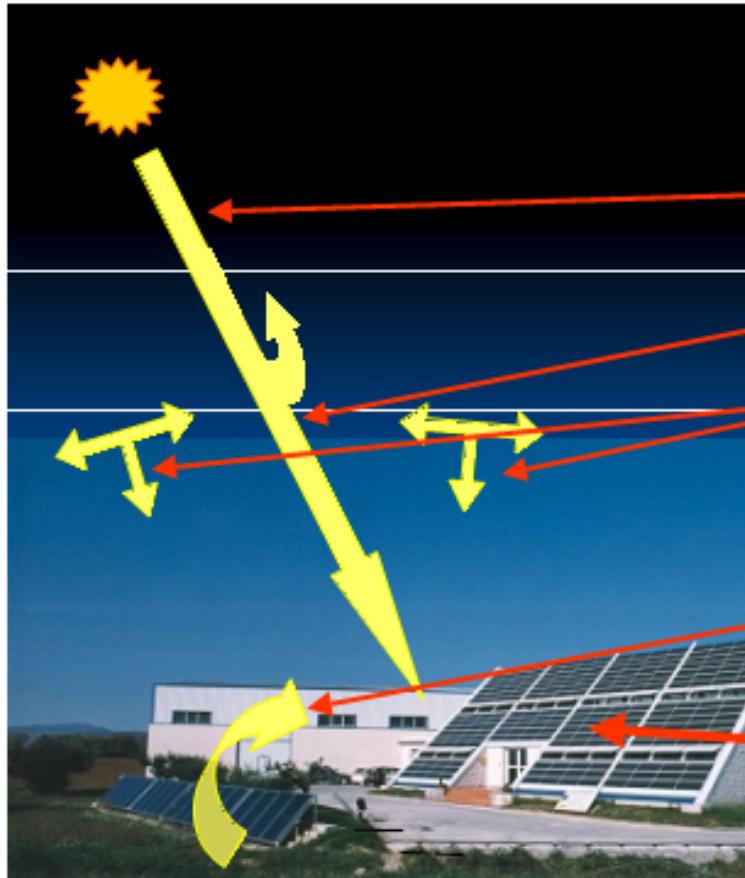
Constante Solar: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

“Irradiancia espectral proveniente del sol que incide sobre la unidad de superficie expuesta perpendicularmente a los rayos solares fuera de la atmósfera terrestre”

■ Irradiación o Radiación solar (H)

Energía incidente sobre la unidad de superficie (J/m^2) ó (Wh/m^2) obtenida integrando la irradiancia durante un cierto periodo de tiempo

RADIACIÓN SOLAR



Irradlancia: Potencia por unidad de superficie (kW/m^2)

Irradiación: Energía por unidad de superficie (kWh/m^2)

- **Extraatmosférica:** Fuera de la atmósfera

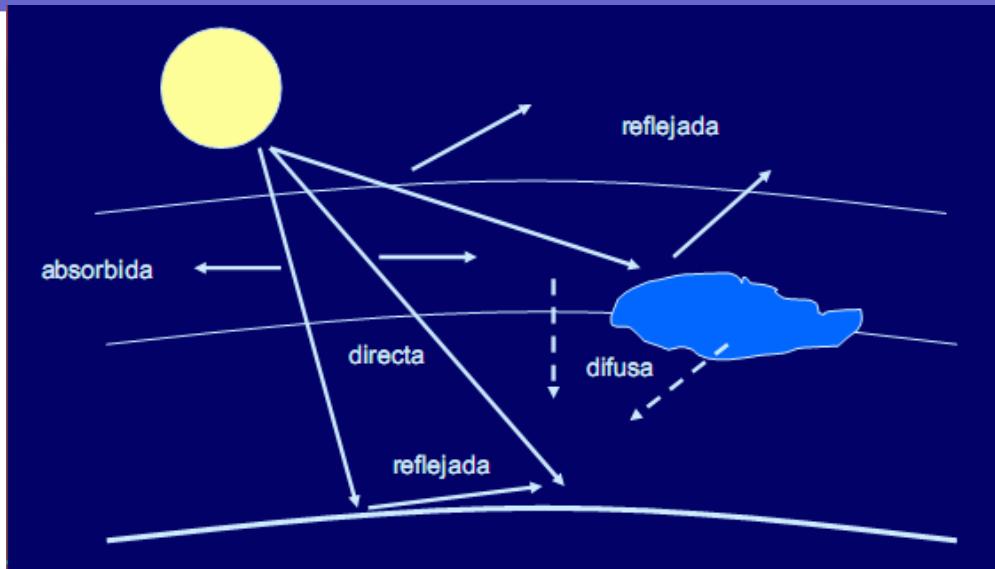
- **Directa:** Procede del sol y depende de su posición

- **Difusa:** Procede de la atmósfera y es la consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción

- **Reflejada:** Procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno

Global = Directa + Difusa + Reflejada: Radiación total incidente sobre una superficie

RADIACIÓN SOLAR



"La radiación solar que llega a nosotros no es algo constante, sino que varía de forma aleatoria debido a diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre. Fundamentalmente en la atmósfera una gran parte de la radiación sufre una absorción y una dispersión como consecuencia de su propia estructura de los agentes variables que allí se encuentran, tales como la polución o la nubosidad"

RADIACIÓN SOLAR PARA GUAYAQUIL (LATITUD -2° N)

	DATOS PROMEDIOS SOLARES DIARIOS												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom.
N [horas]	12.1	12.1	12	12	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.00
Ho [MJ/m ²]	34.9	35.8	37.4	35.2	35	32.4	34.9	36	35.9	37.8	36.9	36.2	35.70
Ho [kWh/m ²]	9.70	9.95	10.40	9.79	9.73	9.01	9.70	10.01	9.98	10.51	10.26	10.06	9.92
G _M [W/m ²]	550	573	647	638	637	540	583	629	647	632	592	611	9.92
G _{bM} [W/m ²]	324	343	409	416	415	330	356	398	421	393	355	380	606.58
H _{SMSH} [kWh/m ²]	4.00	4.17	4.67	4.59	4.56	3.86	4.17	4.50	4.67	4.56	4.31	4.45	4.38

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom.
H _{SMSH} [kWh/m ²]	3.42	4.42	3.39	4.36	4.33	3.58	4.36	3.64	5.69	4.17	3.72	4.61	4.14

- N [horas] : Número del día promedio para cada mes.
Ho [MJ/m²] : Radiación Solar diaria media Extraterrestre
Ho [kWh/m²] : Radiación Solar diaria media Extraterrestre
G_M [W/m²] : Irradiancia total máxima promedio mensual
G_{bM} [W/m²] : Irradiancia máxima directa promedio mensual
H_{SMSH} [kWh/m²] : Irradiación Solar media sobre superficie horizontal

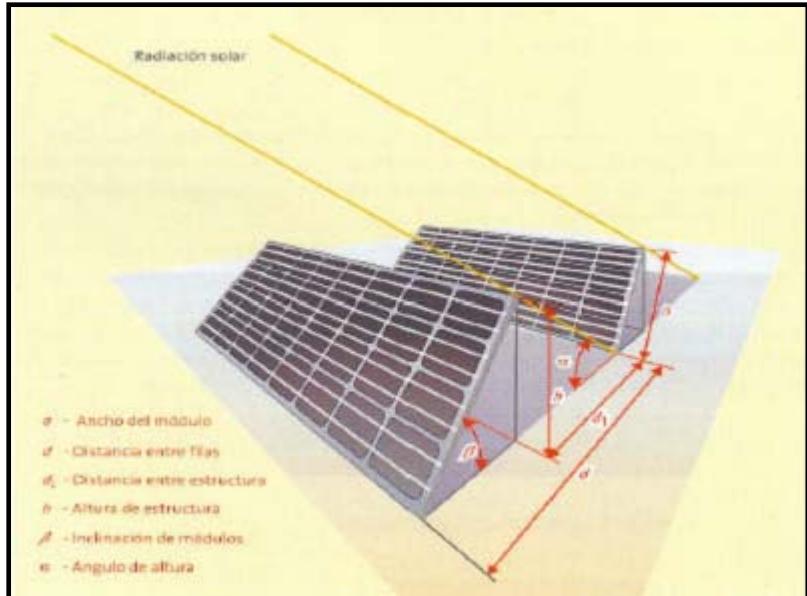
Estudio de OLADE 1987

PERDIDAS DE ENERGÍA

MAXIMAS PERDIDAS PROVOCADAS POR:

	<i>Orientación e inclinación (OI)</i>	<i>Sombras (S)</i>	<i>Total (OI + S)</i>
General	10 %	10 %	15 %
Superposición	20 %	15 %	30 %
Integración arquitectónica	40 %	20 %	50 %

SEPARACIÓN DE PANELES



- σ Ancho del módulo solar
- d Distancia mínima entre filas
- d_1 Distancia mínima entre estructuras
- h Altura de estructura
- β Inclinación de módulos
- α Angulo de altura
- d_2 Distancia de seguridad entre estructuras
- d_T Distancia Total entre filas.

$$h = \sigma * \operatorname{sen}\beta$$

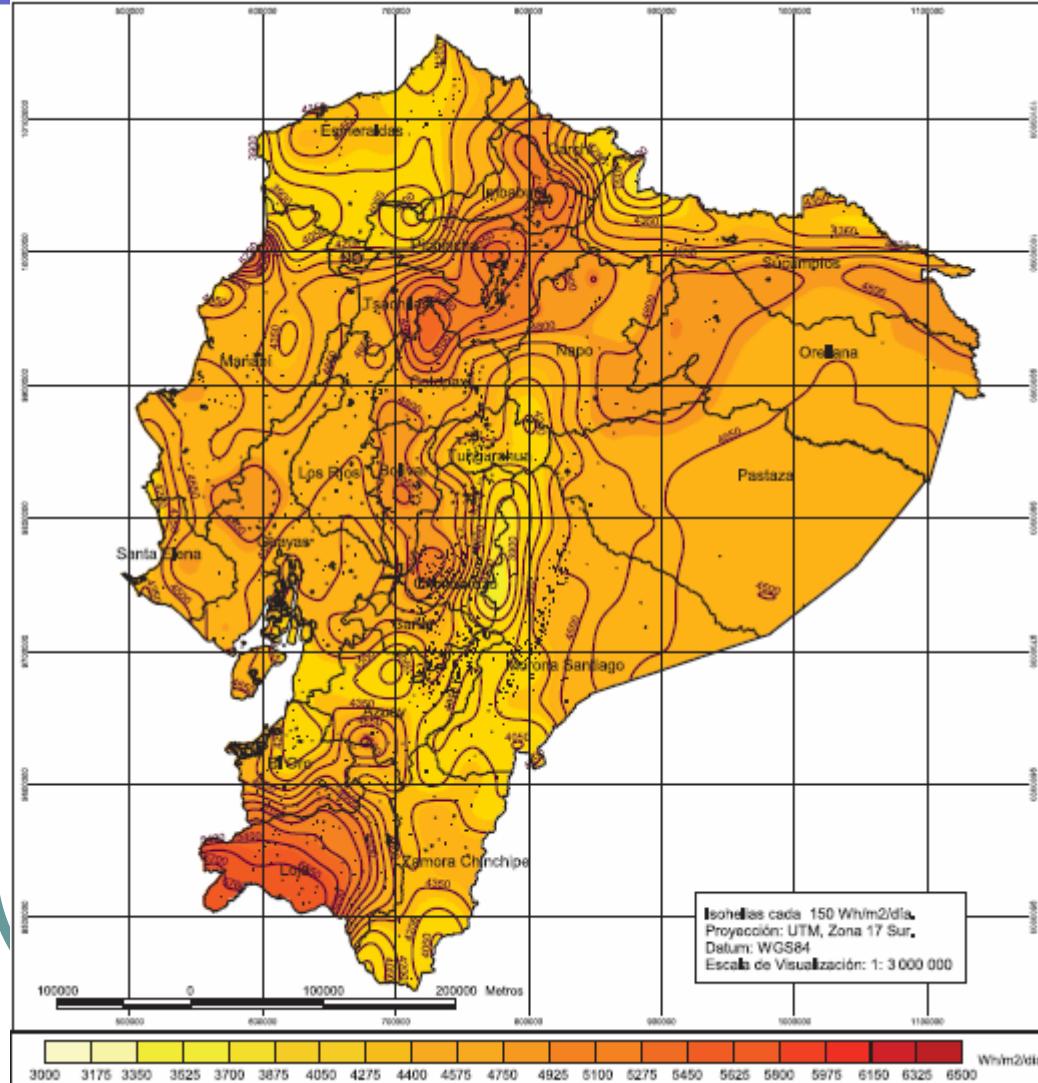
$$d = \sigma * \cos(\beta) + d_1$$

$$d_1 = \frac{h * \cos(\alpha)}{\operatorname{sen}(\alpha)}$$

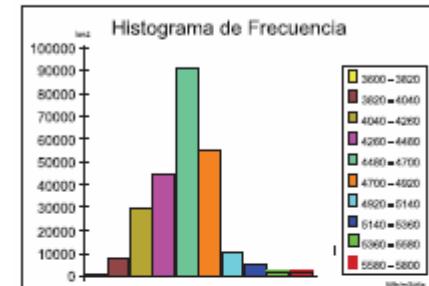
α = Altura Solar cambia durante el año, se suele elegir la mínima en guayaquil
68.75°

$$\alpha = 90^\circ - \text{Latitud del Lugar (Norte + , Sur -)}^\circ - 23.5^\circ$$

ATLAS SOLAR DEL ECUADOR



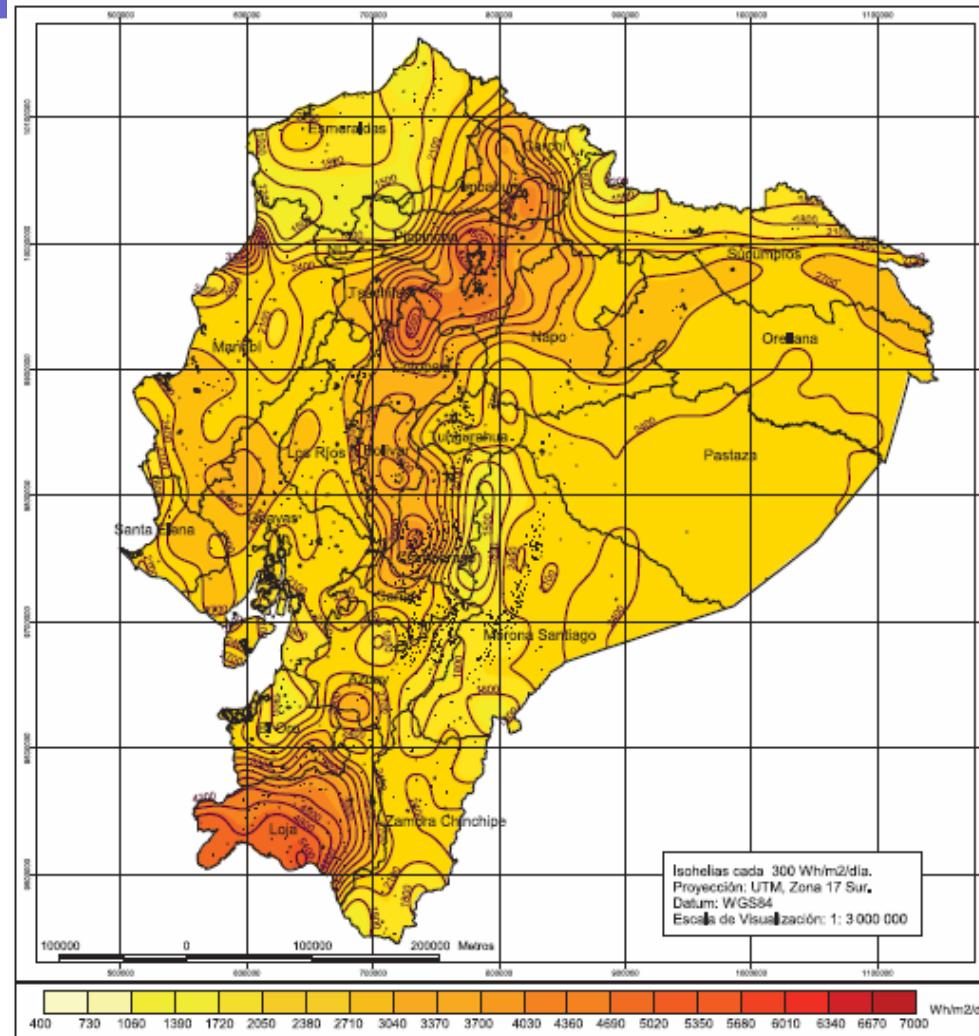
*Insolación Global
Promedio*



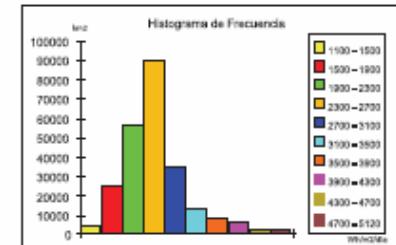
Valor Máximo: 5 748 Wh/m²/día
Valor Mínimo: 3634 Wh/m²/día
Valor Promedio: 4574,99 Wh/m²/día
Desviación Estándar: 301,4093 Wh/m²/día



ATLAS SOLAR DEL ECUADOR



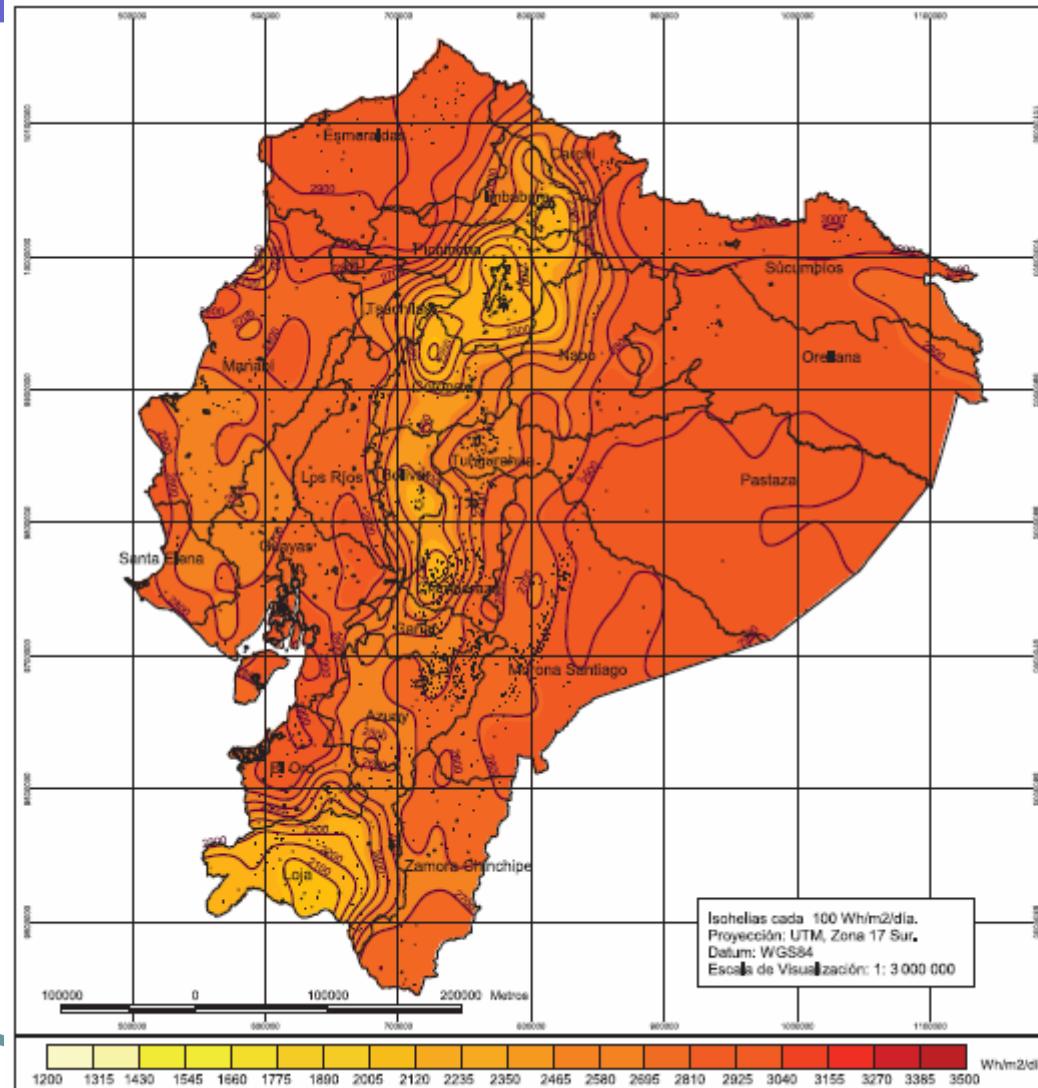
Insolación Directa Promedio



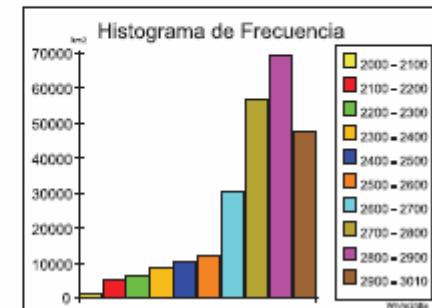
Valor Máximo: 5 119 Wh/m²/día
Valor Mínimo: 1 147 Wh/m²/día
Valor Promedio: 2543,01 Wh/m²/día
Desviación Estándar: 643,1827 Wh/m²/día



ATLAS SOLAR DEL ECUADOR



Insolación Difusa Promedio



Valor Máximo: 3 105 Wh/m²/día
Valor Mínimo: 2 032 Wh/m²/día
Valor Promedio: 2737,05 Wh/m²/día
Desviación Estándar: 196,8432 Wh/m²/día



VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA



VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

VENTAJAS

- **Es una fuente energética gratuita e inagotable, más respetuosa con el medio ambiente que las energías convencionales**
- **En el medio físico no existen afecciones:**
 - **Ni sobre la calidad del aire**
 - **Ni sobre los suelos**
 - **No provocan ruidos**
 - **No se afecta a la hidrología existente**
- **Las instalaciones solares térmicas tienen un carácter autónomo y descentralizado => equilibrio estratégico sobre el suministro de energía y desarrollo más sostenible.**

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

VENTAJAS

- **Proporciona una alta rentabilidad económica:**
 - Vida útil de las instalaciones = 20 años
 - Mínimos requerimientos de operación y mantenimiento.
Gastos mantenimiento = 5% - 10% de los ahorros económicos derivados del ahorro de combustible
- **Reducción del combustible consumido por los equipos convencionales del 60-70% dependiendo de varios factores de diseño**
 - Ahorro energético
 - Disminución del impacto medioambiental

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

INCONVENIENTES

- **Altos costes de la instalación**
- **Técnica aún insuficiente en cuanto al almacenamiento de la energía, y la calidad y eficiencia de los materiales**
- **Necesidad de una inversión inicial elevada => Realizar una instalación de energía solar térmica representa adelantar el pago de la energía futura a obtener del sistema**
- **Algunos instaladores no prestan cuidado en la integración de los equipos en los edificios => rechazo en la sociedad y arquitectos**

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

INCONVENIENTES

- En el sentido legislativo y normativo, el mercado solar térmico no se ha encontrado suficientemente regulado por prescripciones que aseguren su correcto desarrollo
- Falta de una normativa específica para este tipo de instalaciones => recelo frente a la adopción de esta nueva tecnología
- Todo el proceso necesario relacionado con las subvenciones al sector sufre de cierta rigidez => Muchos programas de desarrollo y subvención no poseen suficiente estabilidad => falta de claridad en las condiciones de la inversión => incertidumbres en el mercado

ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO

SUBSISTEMAS DE LA INSTALACIÓN

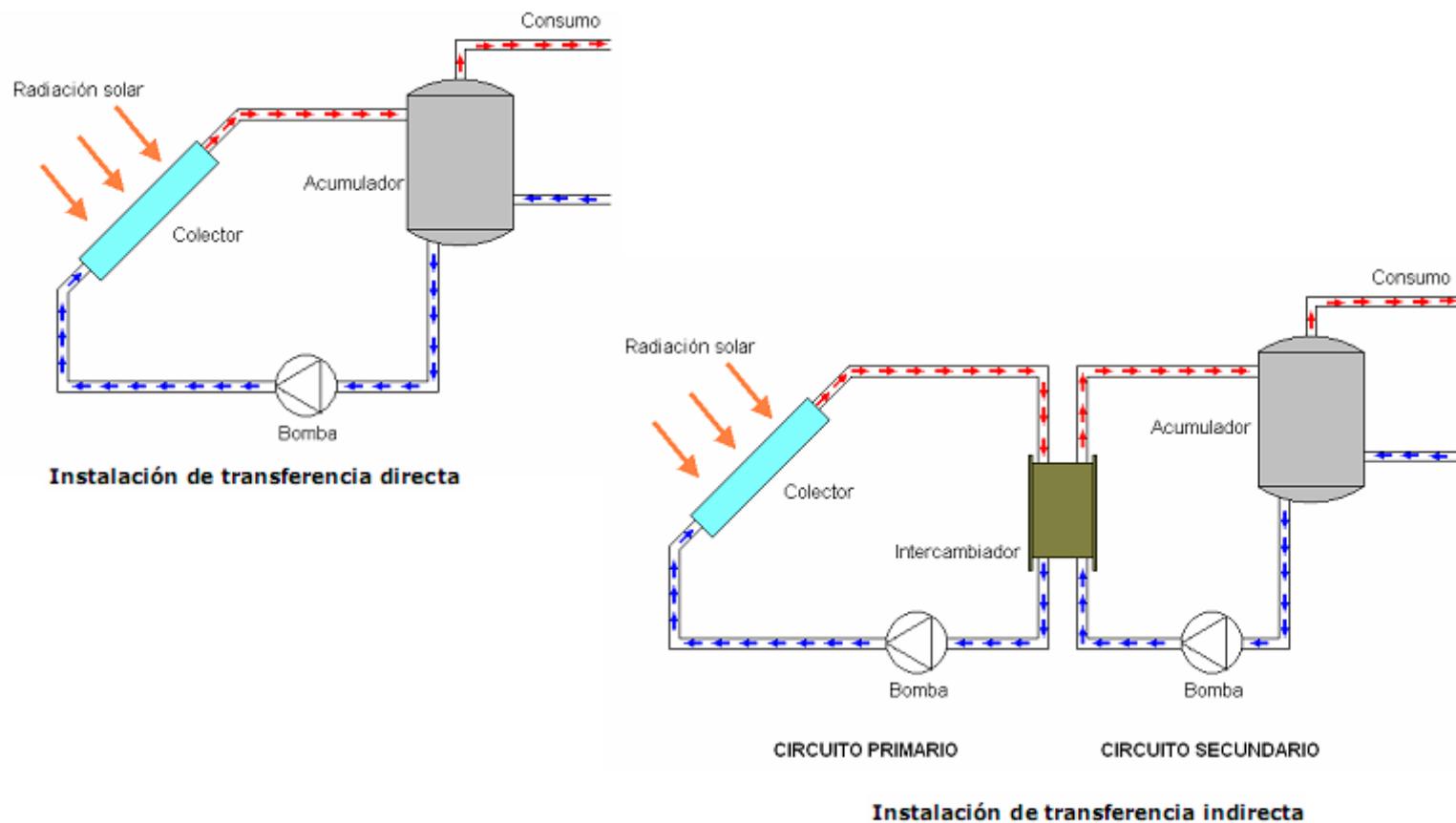
- **Subsistema de captación**
 - Varios colectores solares conectados en serie y/o paralelo
- **Subsistema de acumulación**
 - Uno o más depósitos para el almacenamiento del agua caliente
- **Subsistema de distribución**
 - Equipo de regulación, tuberías, bombas, elementos de seguridad, etc.
- **Subsistema auxiliar**

ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO

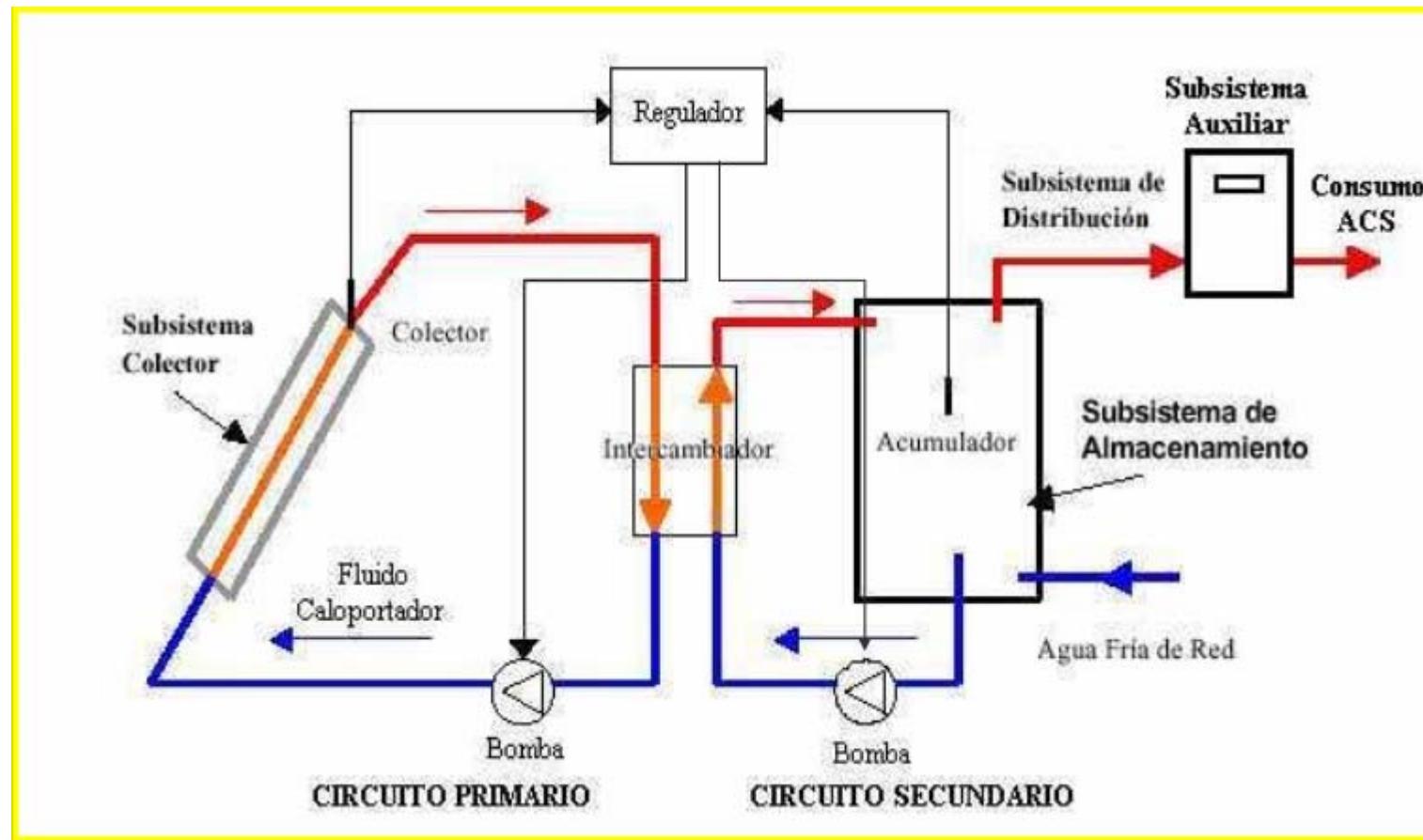
ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA INSTALACIÓN

- **Colector/es solares**
- **Depósito/s de acumulación**
- **Intercambiador de calor (interno/externo)**
- **Sistema auxiliar generador de energía**
- **Sistema circulador (bombas)**

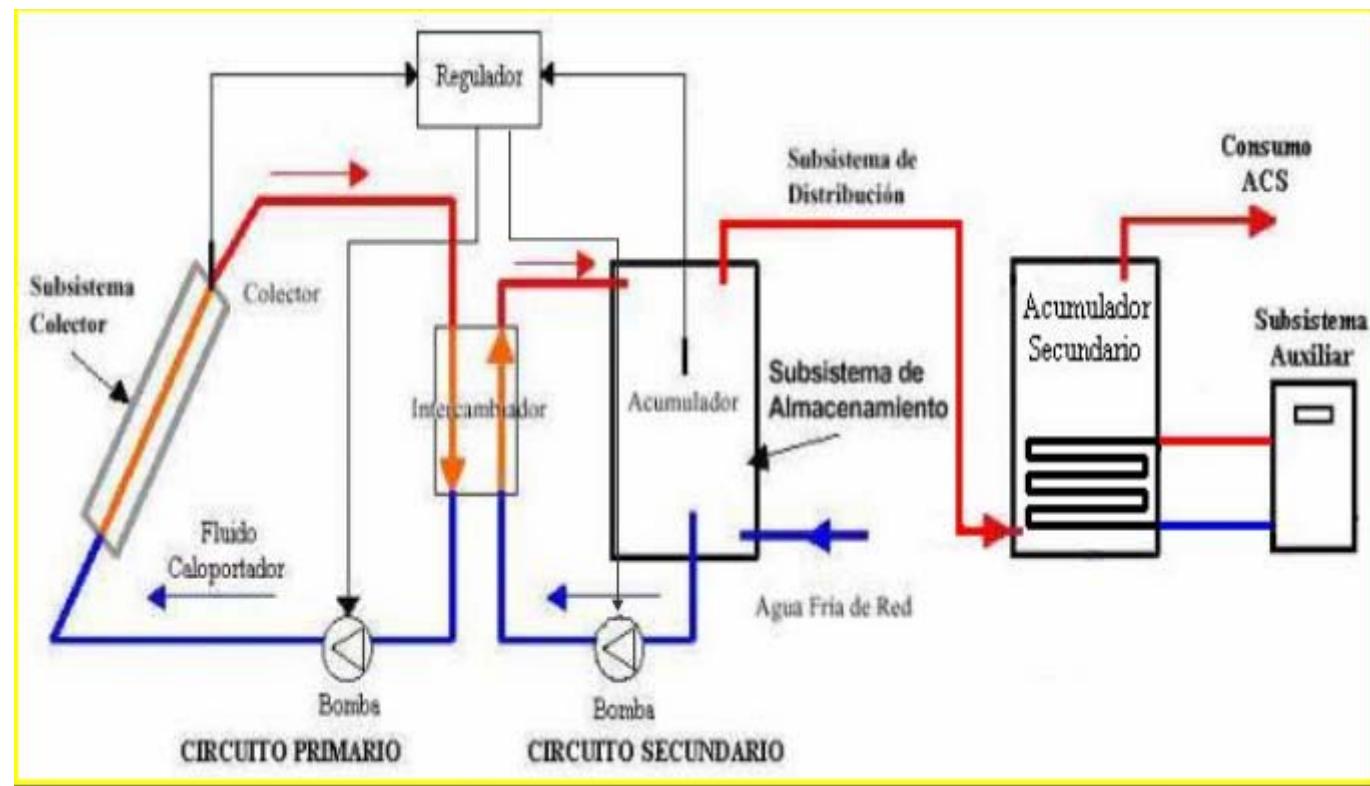
ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO



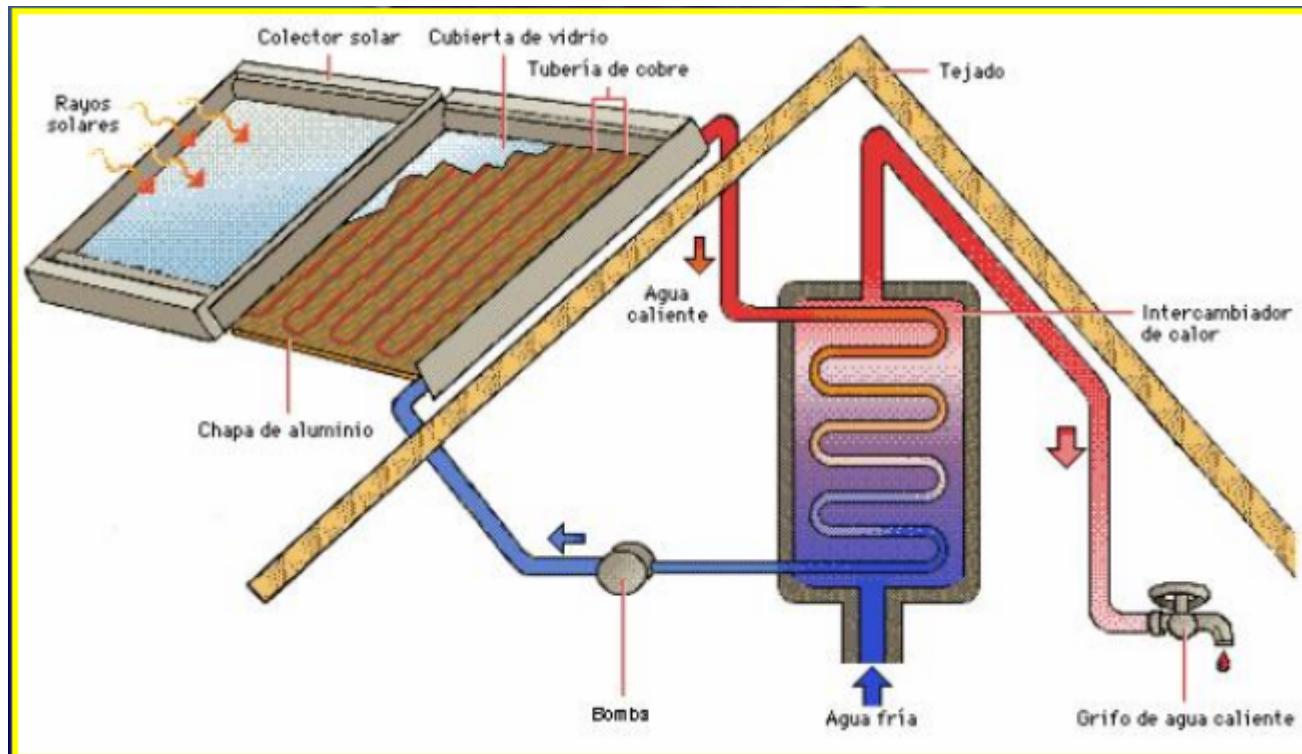
ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO



ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO



ESQUEMA BASICO DE UN SISTEMA SOLAR TERMICO



SIMBOLOGIA

	Captador solar		Valvula antirretorno
	Electrocirculador		Valvula de corte
	Purgador		Valvula de vaciado
	Sonda		Valvula de seguridad
	Manometra		Compensador de dilatacion
	Termometro		Valvula multidireccional
	Intercambiador de placas		Filtro de cesta

CONEXIÓN DE COLECTORES

En las siguientes figuras se presentan distintas formas de realizar el conexionado entre los colectores: conexión en serie / conexión en paralelo.

En general el conexionado de los colectores en serie (Figura 29) conlleva un menor caudal, una menor longitud de tubería, un menor diámetro necesario para la tubería, y un menor rendimiento global de la instalación. Por ello, en la mayor parte de las instalaciones los colectores se montan en paralelo.

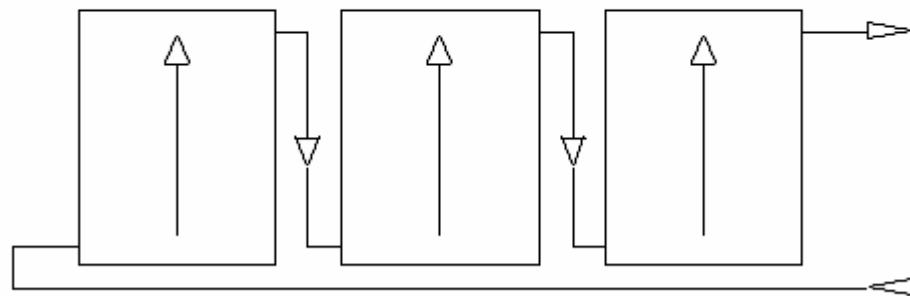


Figura 29. Conexión de colectores solares en serie (Fuente: IDAE)

CONEXIÓN DE COLECTORES

El conexionado de los colectores en paralelo (Figura 30) conlleva un mayor caudal, mayor longitud de tubería, un mayor diámetro necesario para la tubería, y un mayor rendimiento global de la instalación.

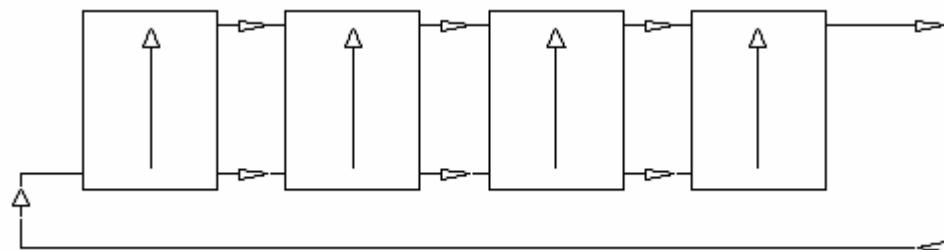


Figura 30. Conexión de colectores solares
en paralelo (Fuente: IDAE)

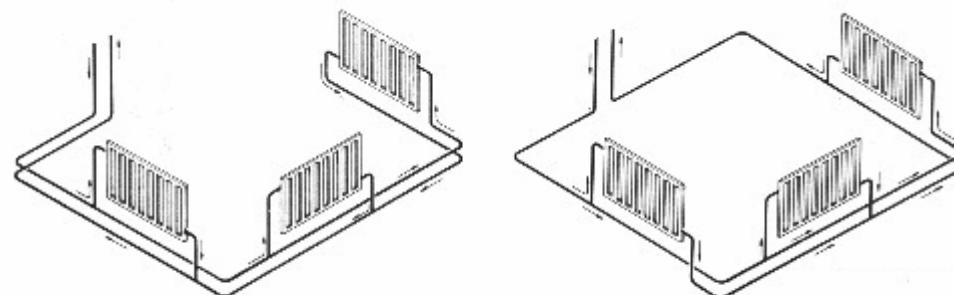


Figura 31. Sistemas de retorno directo (izquierda) y retorno invertido (derecha) para colectores solares en paralelo (Fuente: www.wirsbo.es)

CONEXIÓN DE COLECTORES

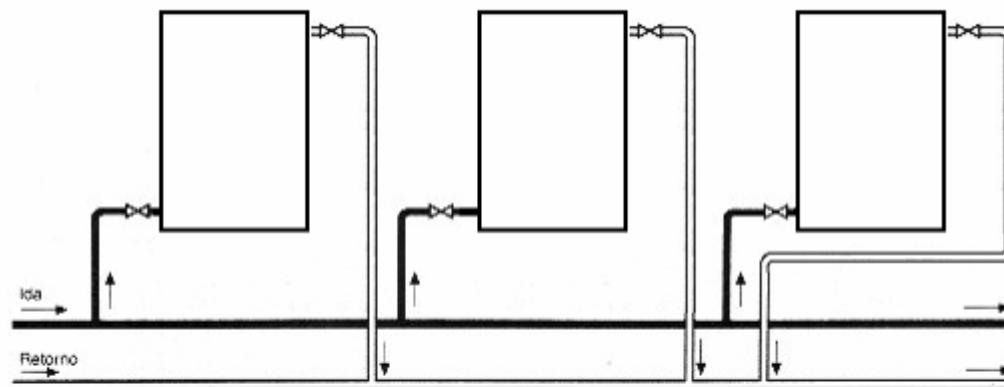
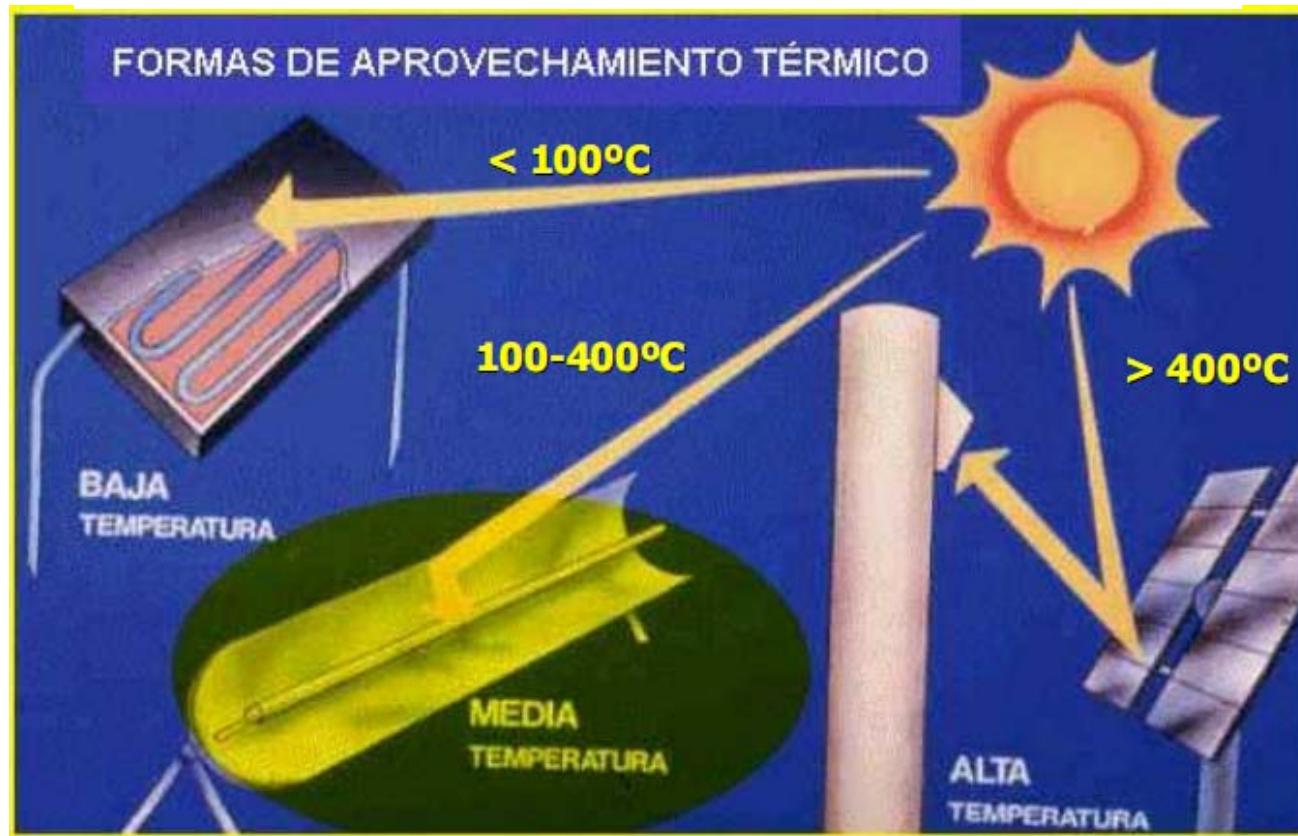


Figura 32. Sistema de retorno invertido para colectores solares en paralelo

(Fuente: www.wirsbo.es)

TIPOS DE COLECTORES

En la actualidad existen tres grandes grupos de colectores solares en función de la temperatura a la que sean capaces de calentar el fluido: baja (menos de 100°C), media (entre 100 y 400°C), y alta temperatura (más de 400°C).



TIPOS DE COLECTORES

Colectores de Baja Temperatura

1. De Polipropileno
2. De Placa Plana
3. De Tubos en Vacío

TIPOS DE COLECTORES

Colectores de polipropileno

Los colectores de polipropileno se componen de una gran cantidad de diminutos tubos de dicho material por los que circula el agua a calentar. Están especialmente recomendados para el calentamiento de piscinas exteriores en temporada de verano, ya que su temperatura de trabajo es del orden de 25-35°C, y no poseen ningún tipo de cubierta exterior, aislante, ni caja; por lo que las pérdidas son grandes, lo que limita su aplicación a otro tipo de instalaciones. Debido a su composición, estos colectores toleran bien el paso de aguas agresivas (agua de piscina clorada), pero aguantan mal las tensiones mecánicas (heladas), y los rasguños superficiales. Su precio oscila entre 60 - 90 €/m².

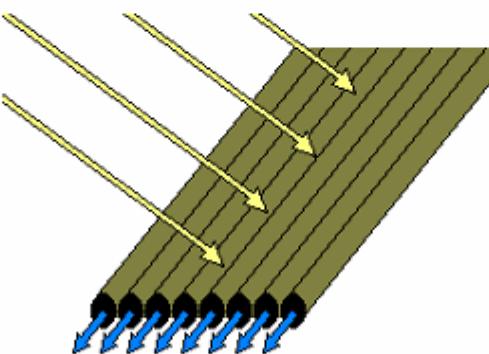


Figura 2. Colector solar de polipropileno

TIPOS DE COLECTORES

Colectores de placa plana

Los colectores de placa plana son en la actualidad los más extendidos comercialmente. Su temperatura de trabajo se sitúa en un rango de 50-70°C, por lo que están indicados para producir agua caliente para muy diversas aplicaciones: ACS, calefacción por suelo radiante, precalentamiento del fluido de entrada de una caldera, etc. Su precio es del orden de 180 - 240 €/m².



Figura 3. Colector solar de placa plana (Fuente: Isofoton)

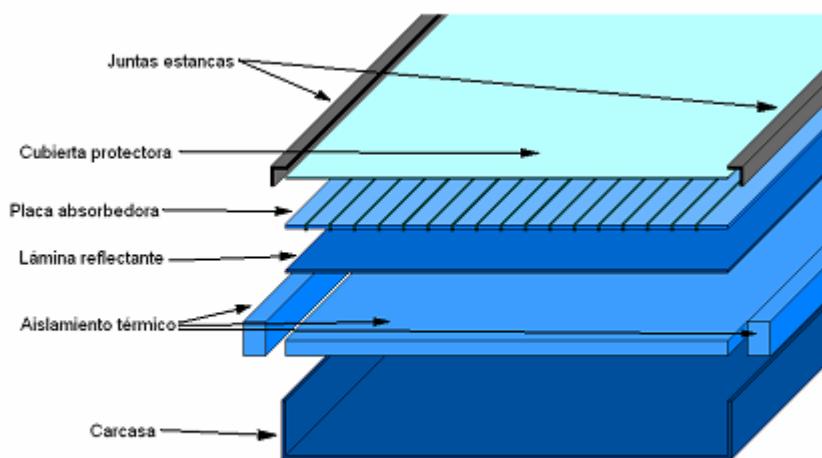


Figura 4. Corte transversal de un colector de placa plana

TIPOS DE COLECTORES

Colectores de tubos de vacío

Los colectores de tubos de vacío poseen un mejor rendimiento y proporcionan mayores temperaturas que los colectores de placa plana, pudiendo llegar a temperaturas de trabajo por encima de 100°C. Por ello, la aplicación más habitual de este tipo de colectores es la generación de agua caliente para su aprovechamiento en procesos industriales o bien en una instalación de calefacción por radiadores convencionales, y para la refrigeración mediante máquinas de absorción. Los principales inconvenientes que presentan estos colectores frente a los de placa plana son su elevado precio, y la mayor laboriosidad y cuidado que requiere su montaje. Su coste oscila entre 500 - 600 €/m².

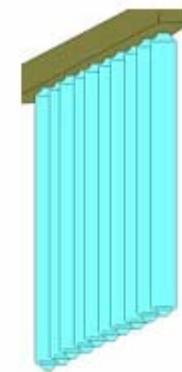


Figura 5. Colector de tubos de vacío

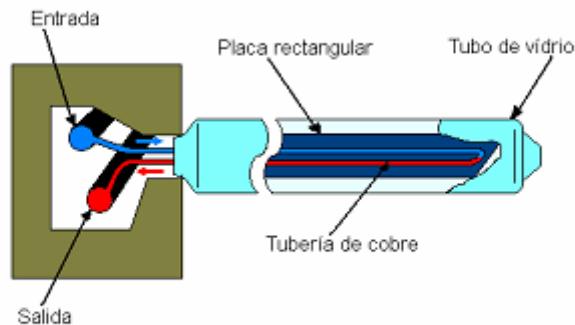
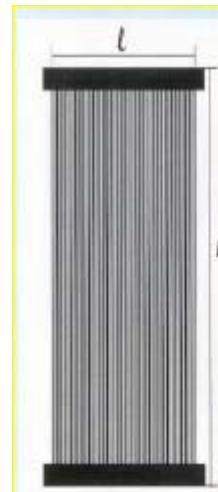


Figura 6. Funcionamiento de un colector de tubos de vacío

TIPOS DE COLECTORES



Características

Material : Polipropileno

Dimensiones : 1,20 x 2,98 m (l x L)
= 3,56 m²

Peso : 10 kg/m²

Contenido : 5 litros/m²



TIPOS DE COLECTORES



TIPOS DE COLECTORES

Colectores de media temperatura

Estos colectores tienen un pequeño índice de concentración de los rayos solares, consiguiendo, de este modo, temperaturas más elevadas al aumentar la radiación por unidad de superficie. La temperatura de trabajo se sitúa en un rango de 100-400°C. Los más representativos son los colectores cilíndrico - parabólicos.

Colectores Cilíndrico-Parabólicos (CPC)

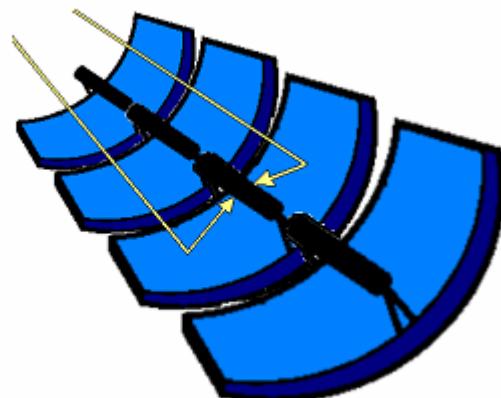


Figura 7. Colectores cilíndrico - parabólicos

TIPOS DE COLECTORES

Colectores Cilíndrico-Parabólicos (CPC)

Los CPC son colectores que concentran la radiación solar incidente - con relaciones de concentración entre 15 y 50 - por medio de una superficie reflectora con forma cilíndrica, en un receptor lineal (tubería) por el que circula el fluido (aceite) a calentar. Su temperatura de trabajo típica es de 390°C, lo que permite la puesta en marcha de un ciclo termodinámico, produciendo vapor sobrecalentado que alimenta una turbina convencional para generar electricidad. Su principal aplicación es, por tanto, la generación de vapor para la producción eléctrica.

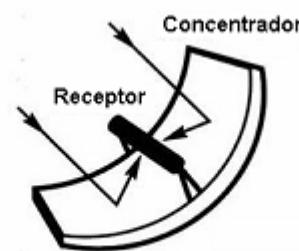


Figura 8. Principio de funcionamiento de un colector cilíndrico - parabólico

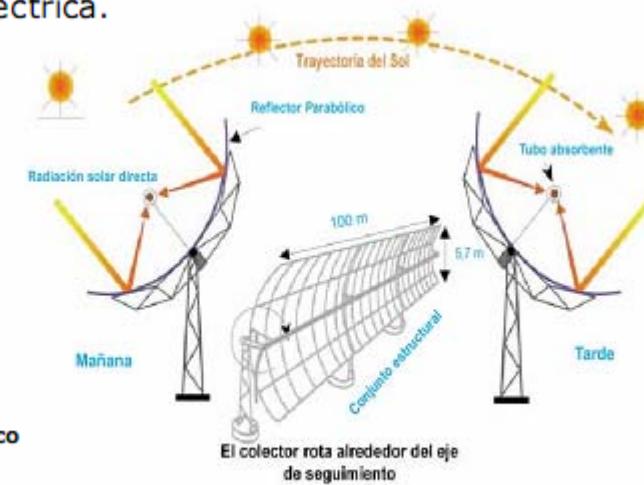


Figura 9. Mecanismo de seguimiento solar en un CPC (Fuente: IDAE)

TIPOS DE COLECTORES

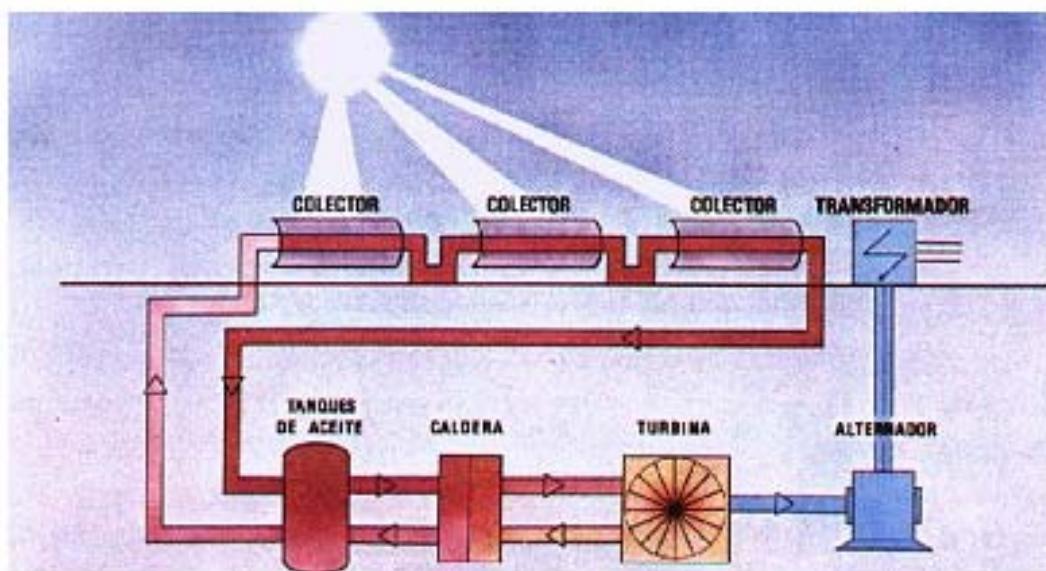


Figura 10. Esquema simplificado de una central solar de media temperatura (Fuente: IDAE)

TIPOS DE COLECTORES

Colectores de alta temperatura

Estos colectores tienen un alto índice de concentración de la radiación solar, consiguiendo temperaturas de trabajo por encima de 400°C. En la actualidad se utilizan solo en instalaciones de ensayo y demostración aplicadas a la generación eléctrica, el ensayo de materiales industriales, la desalinización de agua marina por evaporación, etc. Los más representativos son los heliostatos y los discos parabólicos.

Los heliostatos.

Son espejos muy pulidos con una superficie de 40-140 m² que focalizan la radiación solar concentrándola en un receptor situado en la parte superior de una torre, para lo cual están dotados de un preciso mecanismo de seguimiento solar en 2 ejes (acimutal y altura solar) accionado por motores eléctricos o hidráulicos. En la torre, el receptor, que actúa como un intercambiador de calor, convierte la radiación solar en calor, alcanzándose temperaturas superiores a 1000°C.

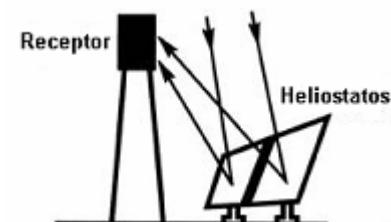


Figura 11. Principio de funcionamiento
de un helióstato

TIPOS DE COLECTORES

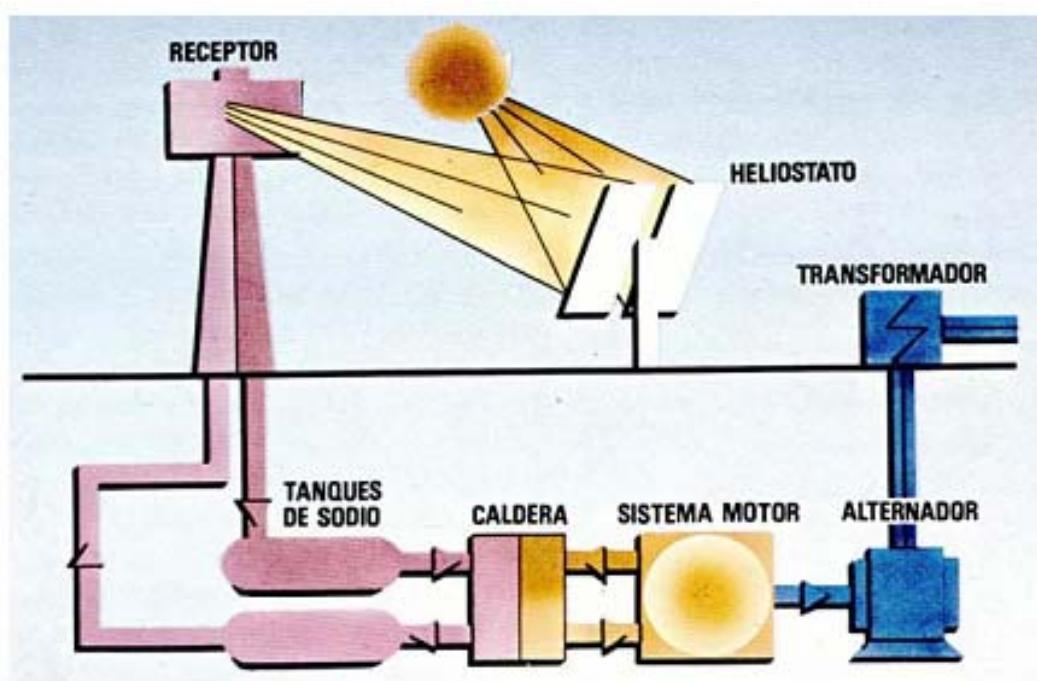


Figura 12. Esquema simplificado de una central solar de alta temperatura (Fuente: IDAE)

TIPOS DE COLECTORES

Los discos parabólicos.

Están formados por una superficie reflectora en forma de paraboloides que concentra los rayos solares sobre un receptor puntual que contiene un gas (helio, aire), consiguiendo elevar su temperatura hasta los 800°C.

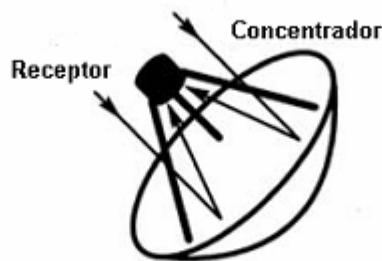


Figura 13. Principio de funcionamiento de un disco parabólico

Como se aprecia en la Figura, un espejo parabólico dirigido hacia el sol, y con seguimiento en los 2 ejes, concentra la radiación solar directamente al foco de un absorbedor instalado junto al espejo. En este se calienta un gas (helio, aire) aproximadamente a 800° C para la impulsión de un motor stirling o una turbina de gas que se encuentra inmediatamente al lado del absorbedor.

TIPOS DE COLECTORES

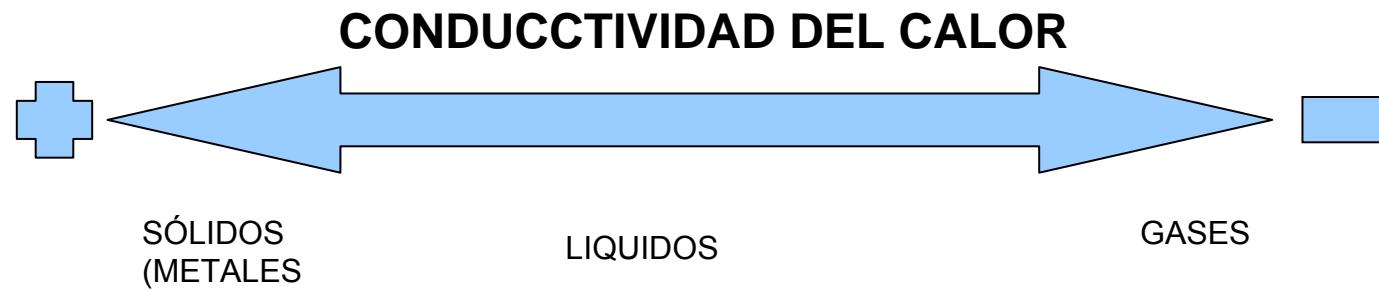
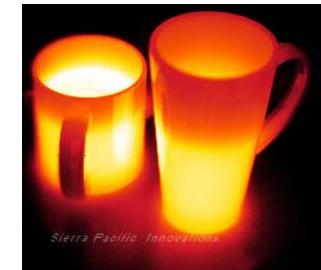
CUADRO COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE COLECTORES

	Cilíndrico-Parabólicos	Centrales de Torre	Generadores de Disco Parabólicos
Tamaño (MW)	30 – 320 (*)	10 – 200 (*)	5 – 25 (kW) (*)
Temperatura operación (°C)	400	600	750
Eficiencia pico (%)	20 (d)	23 (p)	29,4 (d)
Eficiencia Neta Anual (%)	11 – 16 (*)	7 – 20 (*)	12 – 25 (p)
Estado Comercial	Comercialmente disponible	Demostración a gran escala	Demostración de prototipos
Riesgo Tecnológico	Bajo	Medio	Alto
Disponibilidad de Almacenamiento	Limitado	Sí	Batería
Coste (€/m ²)	491 – 255 (*)	440 – 185 (*)	2870 – 296 (*)
Coste (€/W)	3,7 – 2,5 (*)	4,0 – 2,3 (*)	11,7 – 1,2 (*)

Tabla 1. Resumen de la tipología y aplicaciones de instalaciones solares termoeléctricas
(Fuente: "Overview of Solar Thermal Technologies". Department of Energy's Concentrating Solar Power Program. U.S. Department Of Energy (DOE)). Notación: (*)= Cambios en el periodo 1997 – 2030; (p)= Previsión; (d)= Demostrado

Cómo se transporta el calor?

- Conducción.- Contacto
- Convección.- Mezcla de Líquidos
- Radiación.- Sin contacto (a través del vacío), mediante radiación infrarroja.



PROPIEDADES DE LOS COLECTORES

La radiación al llegar al colector ocurre:

- Reflexión
- Transmisión
- Absorción

PROPIEDADES DE LOS COLECTORES

Propiedades ópticas del vidrio

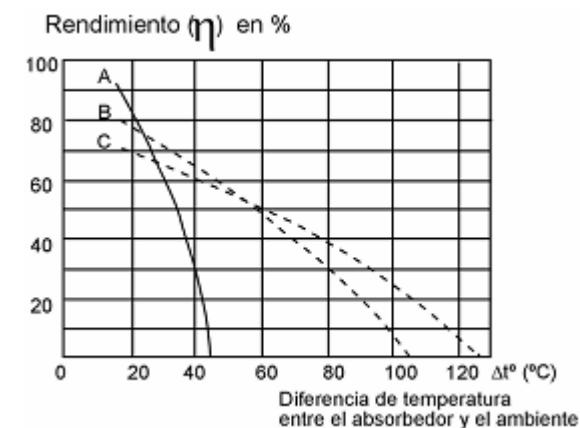
Las propiedades ópticas del vidrio se pueden analizar por medio de un coeficiente, llamado transmitancia o coeficiente de transmisión, que se define como sigue:

$\tau = \text{Energía que atraviesa el vidrio} / \text{Energía incidente sobre el vidrio}$

Este coeficiente será siempre inferior a la unidad. En la siguiente tabla se muestra el coeficiente de transmisión típico de un vidrio en función del espesor y del ángulo de incidencia de la radiación solar.

Espesor (mm)	Ángulo de incidencia ($^{\circ}$)					
	0 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	45 $^{\circ}$	60 $^{\circ}$	75 $^{\circ}$
3	86	86	86	84	77	54
4	85	84,5	84	82	75	54
5	83	83	82,5	80	73,5	51
6	81,5	81	81	78,5	72	50

Tabla 3. Coeficiente de transmisión energética a la radiación de onda corta (%) en función del ángulo de desviación de la radiación directa con la normal a la superficie del vidrio con distintos espesores



donde:

A: Sin cubierta.

B: Una cubierta.

C: Dos cubiertas.

Figura 35. Comparación de rendimientos obtenidos con distintas cubiertas (condiciones: $I=1000 \text{ W/m}^2$, $t_s=15^{\circ}\text{C}$, velocidad del viento=20 km/h)

PROPIEDADES DE LOS COLECTORES

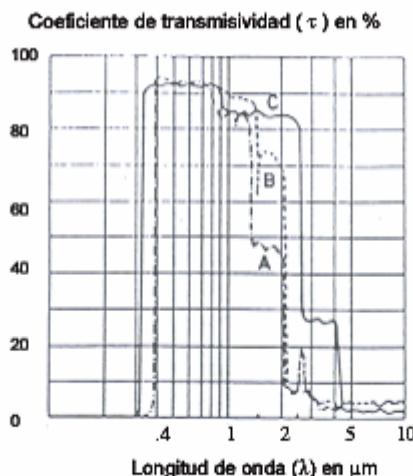


Figura 34. Transmitancia espectral de materiales plásticos utilizados en cubiertas donde: A: Metacrilato de 3 mm de espesor, B: Policarbonato de 3 mm de espesor, C: Vidrio de 3 mm de espesor.

Material	Conductividad térmica a 50°C (W/mK)	Temperatura máxima de utilización (°C)	Observaciones
Lana de vidrio	0,050	150	Sensibilidad a la humedad
Lana de roca	0,050	150	Sensibilidad a la humedad
Espuma de vidrio	0,057	150	-
Corcho expandido	0,42	110	-
Poliestireno	0,42	85	Moldeado
Poliuretano	0,027	110	Espuma

Tabla 4. Características de algunos aislantes usualmente utilizados

Cubiertas transparentes de materiales plásticos

Algunas ventajas que ofrecen este tipo de cubiertas frente a las de vidrio convencional son las siguientes:

- Baja densidad, lo cual facilita el mantenimiento en caso de sustitución.
- Poca fragilidad, disminuyendo los riesgos de rotura durante el transporte, colocación, operaciones de mantenimiento, etc.
- Mala conductividad térmica, lo que permite reducir la temperatura de la superficie externa de la cubierta, reduciendo así las pérdidas por radiación y convección al ambiente.

Los principales inconvenientes de las cubiertas de plástico frente a las cubiertas convencionales de vidrio utilizadas comúnmente en los colectores solares son:

- Coeficiente de dilatación lineal elevado, lo que provoca el abombamiento de las placas gruesas, puesto que las caras exteriores estarán más calientes que las interiores.
- Poca resistencia a temperaturas elevadas. Esto ocasiona problemas en caso de sobrecalentamientos ocasionales, como cuando se para la instalación.
- Dureza baja, lo que produce que se raye fácilmente, disminuyendo el coeficiente de transmisión solar, y por tanto, el rendimiento del colector.
- Inestabilidad química y degradación bajo la acción de los agentes ambientales, en especial de la radiación solar ultravioleta, y de las variaciones de temperatura a las que están sometidas las cubiertas de los colectores.

RENDIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR PLACA PLANA

Balance de energía en un colector de placa plana

El balance energético de un colector plano es el siguiente:

$$Q_{\text{incidente}} = Q_{\text{útil}} + Q_{\text{pérdidas}}$$

donde:

- $Q_{\text{incidente}}$: Energía incidente total (directa+difusa+albedo) por unidad de tiempo. (W)
- $Q_{\text{útil}}$: Energía útil (recogida por el fluido calorportador) por unidad de tiempo. (W)
- $Q_{\text{pérdidas}}$: Energía perdida por dissipación al ambiente por unidad de tiempo. (W)

Lógicamente, la energía útil del colector por unidad de tiempo es la diferencia entre la energía absorbida y la energía perdida:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{incidente}} - Q_{\text{pérdidas}}$$

RENDIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR PLACA PLANA

$$Q_{\text{incidente}} = \tau \alpha S I$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = S U_L (t_c - t_a)$$

$$t_m = (t_e + t_s) / 2$$

$$T_c = T_m$$

Por lo tanto:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{incidente}} - Q_{\text{pérdidas}} = \tau \alpha S I - S U_L (t_c - t_a) = S [I(\tau \alpha) - U_L(t_c - t_a)]$$

donde:

- S : Superficie del colector (m^2).
- I : Radiación incidente total sobre el colector por unidad de superficie (W/m^2) o intensidad radiante.
- τ : Transmitancia de la cubierta transparente.
- α : Coeficiente de absorción de la placa absorbadora.
- U_L : Coeficiente global de pérdidas ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).
- t_c : Temperatura media de la placa absorbente ($^\circ\text{C}$).
- t_a : Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$).
- $\tau \alpha$: Corresponde a los valores de estos coeficientes suponiendo una radiación directa normal, por lo que se suele denotar como $(\tau \alpha)_N$.

RENDIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR PLACA PLANA

La ecuación antes vista quedará así:

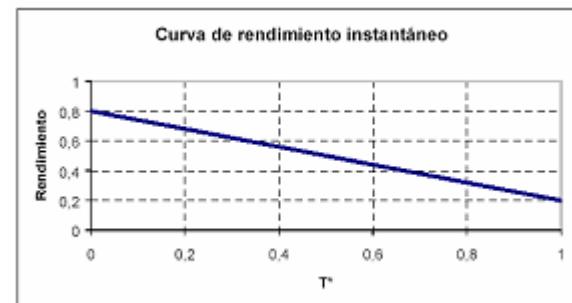
$$Q_{\text{útil}} = S [I(\tau\alpha) - U_L(t_c - t_a)] \approx F_R S [I(\tau\alpha) - U_L(t_m - t_a)] = S [F_R I(\tau\alpha) - F_R U_L(t_m - t_a)]$$

Conocida también como ecuación de Bliss.

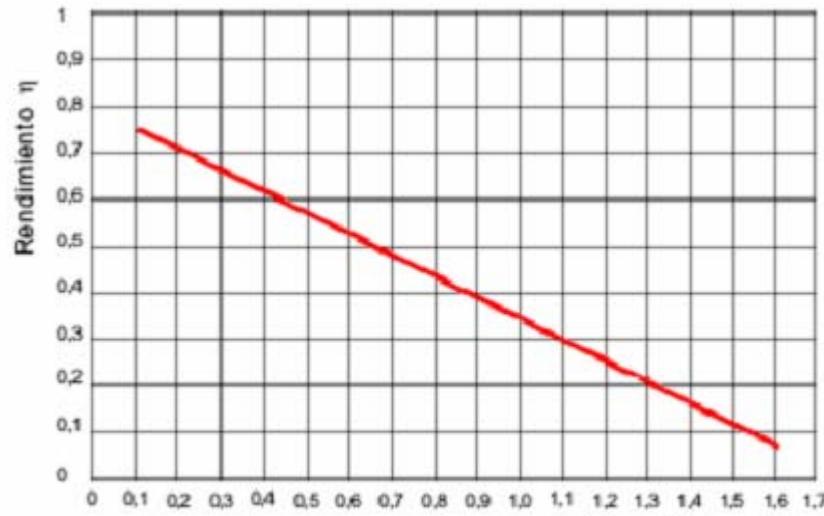
$$\eta = Q_{\text{útil}} / (\text{SI})$$

Sustituyendo $Q_{\text{útil}}$ por su valor, según la ecuación de Bliss, se obtiene la ecuación del rendimiento del colector:

$$\eta = Q / (\text{SI}) = S [F_R I(\tau\alpha)_N - F_R U_L(t_m - t_a)] / (\text{SI}) = F_R (\tau\alpha)_N - (F_R U_L(t_m - t_a) / I)$$



RENDIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR PLACA PLANA



Ecuación característica del colector

$$\eta = 0,801 - 0,3913 T^* - 0,00014 T^{*2}$$

(Valor a título orientativo)

T_m - Temperatura media del colector.

T_a - Temperatura ambiente.

I - Incidencia solar

$$T^* = \frac{U_0 \cdot (t_m - t_a)}{I}$$

U_₀

es una constante incluida por el fabricante y que suele ser
10 W/m² °C.

t_m

es la temperatura de trabajo del fluido a calentar en °C.

t_a

es la temperatura ambiente en °C

I

es la radiación solar incidente total por unidad de superficie
en W/m².

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

Los consumos unitarios máximos recomendados para el diseño de instalaciones solares térmicas de ACS por el IDAE en el Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Solares, se muestran en la Tabla 7. No obstante, hay que considerar que estos valores dependen fuertemente de los hábitos y estilo de vida de los usuarios.

Criterio de consumo	Litros/día	
Viviendas unifamiliares	40	por persona
Viviendas multifamiliares	30	por persona
Hospitales y clínicas	80	por cama
Hoteles ****	100	por cama
Hoteles ***	80	por cama
Hoteles/Hostales **	60	por cama
Camping	60	por emplazamiento
Hostales/Pensiones *	50	por cama
Residencias (ancianos, estudiantes, etc)	80	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	20	por servicio
Escuelas	5	por alumno
Cuarteles	30	por persona
Fábricas y talleres	20	por persona
Oficinas	5	por persona
Gimnasios	30 a 40	por usuario
Lavanderías	5 a 7	por kilo de ropa
Restaurantes	8 a 15	por comida
Cafeterías	2	por almuerzo

Tabla 7. Consumo medio diario en distintos tipos de edificaciones (Fuente: IDAE)

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

El cálculo del número de personas por vivienda deberá hacerse utilizando los valores mínimos siguientes:

<i>Nº de dormitorios</i>	<i>Nº de personas</i>
1	1,5
2	3
3	4
4	6
5	7
6	8
7	9
8	9
Más de 8	Igual que el número de dormitorios

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

Nº ocupantes / camas [1]			
Consumo diario ACS por persona o cama [2]			
Consumo diario ACS en l/día [3]	[1]x[2]	Volumen de acumulación en l [4]	≈ [3]
Nº colectores [5]	[4]:150	Superficie colectora en m ² [6]	[5]x2

Importe del sistema totalmente instalado (€) [7]	[6]x(420 ó 480)
Subvención a fondo perdido (€) [8]	[6]x150
Coste real de la instalación (€) [9]	[7]-[8]
Pago inicial (€) [10]	[9]+([7]x0,16)
Ahorro anual (termias) [11]	[5]x1.350
Ahorro anual (€) [12]	[11]x0,06
Periodo de amortización (años) [13]	[9]:[12]

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

Ejemplo de cálculo

Sea un hotel de 2 estrellas con 98 camas que está interesado en instalar colectores solares para producir ACS. El consumo de ACS del hotel se estima en 60 litros por cama y día.

Simplemente con estos datos es posible realizar una primera valoración de la instalación, por medio de la tabla anterior:

Nº ocupantes / camas [1]	98		
Consumo diario ACS por persona o cama [2]	60		
Consumo diario ACS en l/día [3]	5.880	Volumen de acumulación en l [4]	6.000
Nº colectores [5]	40	Superficie colectora en m ² [6]	80

Importe del sistema totalmente instalado (€) [7]	33.600
Subvención a fondo perdido (€) [8]	12.000
Coste real de la instalación (€) [9]	21.600
Pago inicial (€) [10]	26.976
Ahorro anual (termias) [11]	54.000
Ahorro anual (€) [12]	3.240
Periodo de amortización (años) [13]	6,7

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

METODO F-CHART

1. Calcular, mes a mes, el consumo energético mensual.

La carga mensual de calentamiento de agua caliente sanitaria puede valorarse como:

$$Q_a = C_e \cdot \dot{m} \cdot (t_{ac} - t_r) \cdot n \cdot \rho$$

donde:

- **Q_a** : Carga calorífica mensual [J/mes].
- **\dot{m}** : Cantidad de agua consumida por día [l/día].
- **C_e** : es el calor específico del agua (4187 J/kg.ºC).
- **t_{ac}** : temperatura de acumulación del ACS en ºC (normalmente 45ºC).
- **t_r** : temperatura del agua fría de red en ºC, (tabla 4).
- **n** : número de días del mes considerado.
- **ρ** : densidad del agua (1 kg/l).

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

2. Calcular la energía incidente 'E' sobre la superficie del captador con la inclinación correspondiente.

Buscar el valor de la energía media diaria incidente sobre superficie horizontal por metro cuadrado: H (en MJ/m²día). (tabla 2).

Modificar este valor con el factor k de inclinación según el ángulo elegido y la latitud del lugar. (tabla 5).

Calcular la energía media diaria incidente sobre superficie inclinada: E (en MJ/m²día).

$$E = 0,94 * k * H$$

3. Hallar la intensidad incidente 'I' sobre la superficie del captador.

Dividir la energía E (en julios) entre el número de horas útiles de sol (en segundos). El número de horas de sol se presenta de forma aproximada en la tabla 6.

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

4. Calcular el rendimiento mensual del colector η , a partir de los datos del fabricante y las condiciones de trabajo.

$$\eta = F_R * (\tau * \alpha)_N - F_R * U_L [(t_m - t_a) / I], \text{ donde:}$$

- t_m : temperatura media del fluido caloportador en °C (normalmente 45°C).
- t_a : temperatura ambiente en °C, (tabla 3).

5. Calcular la aportación solar media diaria por m^2 de colector : $\eta * E$ (en MJ/m²/día)

6. Corrección de la aportación:

- Caso general: $0,85 * \eta * E$
- Caso desfavorable: $0,8 * \eta * E$ (si no existe seguridad sobre la validez de los datos utilizados en los cálculos anteriores)
- Caso favorable: $0,9 * \eta * E$ (si se considera que los datos utilizados son perfectamente válidos para la instalación elegida)

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

7. Cálculo de la superficie captadora total necesaria (m²) y del volumen de acumulación total [l]:

$$\text{Superficie Necesaria [m}^2\text{]} = \frac{\text{Demanda anual [MJ/año]}}{\text{Aportación solar anual[MJ/m}^2\text{año]}}$$

Considerando la superficie útil de un captador, se calculará el número de colectores necesarios y se redondeará para obtener un número entero. Una vez redondeado, este número se multiplicará por la superficie útil de un captador obteniendo finalmente la superficie captadora a instalar.

$$S = \text{Superficie captadora a instalar} = \text{Redondear} \left(\frac{\text{Superficie Necesaria}}{\text{Superficie Útil de 1 colector}} \right) * \text{Superficie Útil de 1 colector}$$

Una vez calculados los metros cuadrados de superficie colectora a instalar, se calcula el acumulador necesario considerando un ratio de 70 litros de acumulación por m² instalado.

$$V = \text{Volumen Total de Acumulación [l]} = 70 * S$$

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

METODO F-CHART

A partir de aquí será necesario comprobar la cobertura obtenida, por medio del método de f-Chart que se explica a continuación.

Debido a que la superficie captadora a instalar es mayor que la superficie necesaria antes calculada, se cubrirá una demanda algo mayor. Por ello, hay que corregir el valor de la demanda (Q_a) anteriormente calculado, del siguiente modo:

$$Q_a = Q_a * \text{Superficie captadora a instalar} / \text{Superficie Necesaria}$$

A partir de ahora, en los siguientes pasos, el valor de Q_a a considerar será este valor corregido.

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

8. Calculo del parámetro Y:

El parámetro Y expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador plano y la carga calorífica total de calentamiento durante un mes.

Y = Energía absorbida por el captador / Carga calorífica mensual

$$Y = \frac{F_R(\tau\alpha)_n \times (F'_R/F_R) \times \left((\overline{\tau\alpha}) / (\tau\alpha)_n \right) \times E \times n \times S}{Q_a}$$

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

donde:

- $F_R(\tau\alpha)_n$: Ordenada en el origen de la curva característica del captador.
- S : Superficie captadora a instalar [m^2].
- E : Radiación media diaria recibida por el captador, por unidad de superficie [$MJ/m^2/día$].
- n : Número de días del mes considerado.
- Q_a : Carga calorífica mensual [MJ/mes].
- $(\bar{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$: Es la variación de la absorptancia y la transmitancia con el ángulo de incidencia; 0,96 para cubierta sencilla, 0,94 para cubierta doble.
- F_R'/F_R : Es el coeficiente corrector producido por el intercambio de calor en el sistema acumulador.

$$\frac{F_R'}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{F_R \cdot U_L}{C} \right) \left(\frac{S \cdot C}{\epsilon_C \cdot C_{min}} - 1 \right) \right]^{-1}$$

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

- C : es el ritmo de la capacidad calorífica en el circuito primario por unidad de superficie de colector [en $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$].

$C = C_{e1} * C_1$; donde C_{e1} es el calor específico del fluido del circuito primario (si es agua: $4187 \text{ J/kg}\text{°C}$) y C_1 es el caudal del circuito primario (si es agua: $50/3600 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

- C_{\min} : es el ritmo de la capacidad calorífica mínima entre las dos fases del intercambiador [en $\text{W}/\text{°C}$]. Generalmente $C_{\min} = C * S$.
- ε_c : es la eficiencia del intercambiador [en %].
- $F_R U_L$: Pendiente de la curva característica del captador. [en $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$].

9. Calculo del parámetro X

El parámetro X, expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador, para una determinada temperatura, y la carga calorífica de calentamiento durante un mes.

$$X = \text{Energía perdida por el captador} / \text{Carga calorífica mensual}$$

DIMENSIONAMIENTO BASICO DE INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA METODO F-CHART

$$X = \frac{F_R U_L \times (F'_R / F_R) \times (t_{Ref} - t_a) \times \Delta\text{tiempo} \times S}{Q_a} \times K_1 \times K_2$$

donde:

- S : Superficie captadora a instalar [m^2].
- $(t_{Ref} - t_a)$: Diferencia entre una temperatura de referencia (fijada en 100°C) y la temperatura ambiente t_a .
- Δtiempo : Número de segundos del mes considerado.
- K_1 : Factor de corrección por el almacenamiento.

$$K_1 = \left(\frac{V}{75 \times S} \right)^{-0.25}$$

- V : Volumen total de acumulación [l]
- S : Superficie captadora a instalar [m^2].

- K_2 : Factor de corrección para temperaturas.

$$K_2 = \frac{11.6 + 1.18 * t_{ac} + 3.86 * t_r - 2.32 * t_a}{100 - t_a}$$

- t_a : Temperatura ambiente [en °C].
- t_r : Temperatura de agua fría de red [en °C].
- t_{ac} : Temperatura media de acumulación del ACS [en °C].
- F_R U_L : Pendiente de la curva característica del captador [en $\text{W/m}^2\text{°C}$]

10. Calculo de f-chart

La fracción "f" de la carga calorífica mensual aportada por el sistema de energía solar, puede determinarse por:

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3$$

Con: $0 < Y < 3$ y $0 < X < 18$

11. Cálculo de la cobertura solar mensual

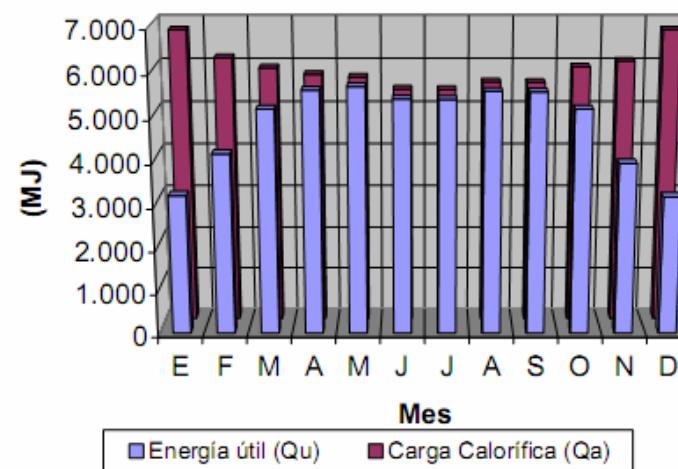
La energía útil (Q_u) captada cada mes tiene el valor:

$$Q_u = f * Q_a, \text{ donde:}$$

- Q_a : Carga calorífica mensual (MJ/mes).

12. Cálculo de la cobertura solar anual

$$\text{Cobertura anual} = \frac{\sum_{\substack{\text{Diciembre} \\ \text{Enero}}} Q_u \text{ necesaria}}{\sum_{\substack{\text{Diciembre} \\ \text{Enero}}} Q_a \text{ necesaria}}$$



AHORRO ECONOMICO

El ahorro económico mensual será:

$$\text{Ahorro [€]} = (\text{Qu} * \text{Cm}) / (\text{PCI} * \eta), \text{ donde:}$$

- Qu: Energía útil [kJ ó kcal]
- PCI: Poder Calorífico Inferior del combustible sustituido [kJ/kg, kJ/l, kJ/m³, kcal/kg, kcal/l ó kcal/m³]
- η: Rendimiento del equipo de apoyo [%]
- Cm: Coste medio del combustible sustituido [€/kg, €/l ó €/m³]

En caso de que el equipo de apoyo sea eléctrico, el ahorro económico mensual se calculará del siguiente modo:

$$\text{Ahorro [€]} = (\text{Qu} * \text{Cm}) / \eta, \text{ donde:}$$

- Qu: Energía útil [kWh]
- η: Rendimiento del equipo de apoyo eléctrico [%]
- Cm: Coste medio del combustible sustituido [€/kWh]