



Universidad de Chile

DIPLOMA DE POSTÍTULO

**DISEÑO DE EDIFICACIONES
ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

Energías Renovables



APUNTES DE ENERGÍA SOLAR

Prof. Roberto Román L.
Universidad de Chile

roroman@ing.uchile.cl
roroman@ecomaipo.cl
www.ecomaipo.cl

A modo de Presentación...

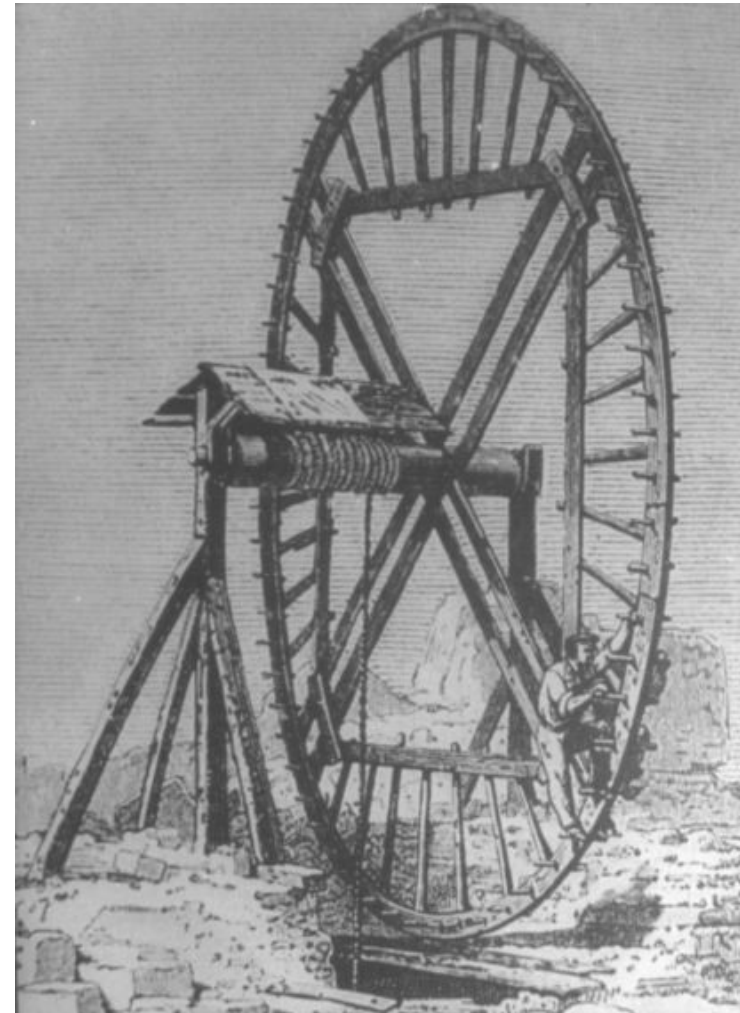
- **Roberto Román Latorre:** Profesor Asociado de la FCFM de la Universidad de Chile (más conocida como "la Escuela de Ingeniería").
- **Ingeniero Civil Mecánico:** especialidad en termofluidos, máquinas térmicas, máquinas hidráulicas. Académico en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile.
- **Especialización en energías renovables:** con especial énfasis en energía solar. Más de 30 años de experiencia en el tema. Actualmente uno de los Vicepresidentes de *ISES* (International Solar Energy Society).
- **Formador de EcoMaipo:** como una manera de propender hacia nuevos modelos de desarrollo. En particular en el Cajón del Maipo (donde resido).

Presentación

- **Antecedentes Generales:** Por qué es de interés el estudio de sistemas solares.
- **Un poco de historia:** algunos aspectos fundamentales en cuanto a la evolución histórica de la utilización de la energía solar por el hombre.
- **Aspectos Básicos de Radiación Solar:** que es la energía solar, como se mide, cual es su variabilidad y como se puede calcular.
- **Métodos de Conversión de la Energía Solar:** conversión térmica, conversión biológica, conversión directa.

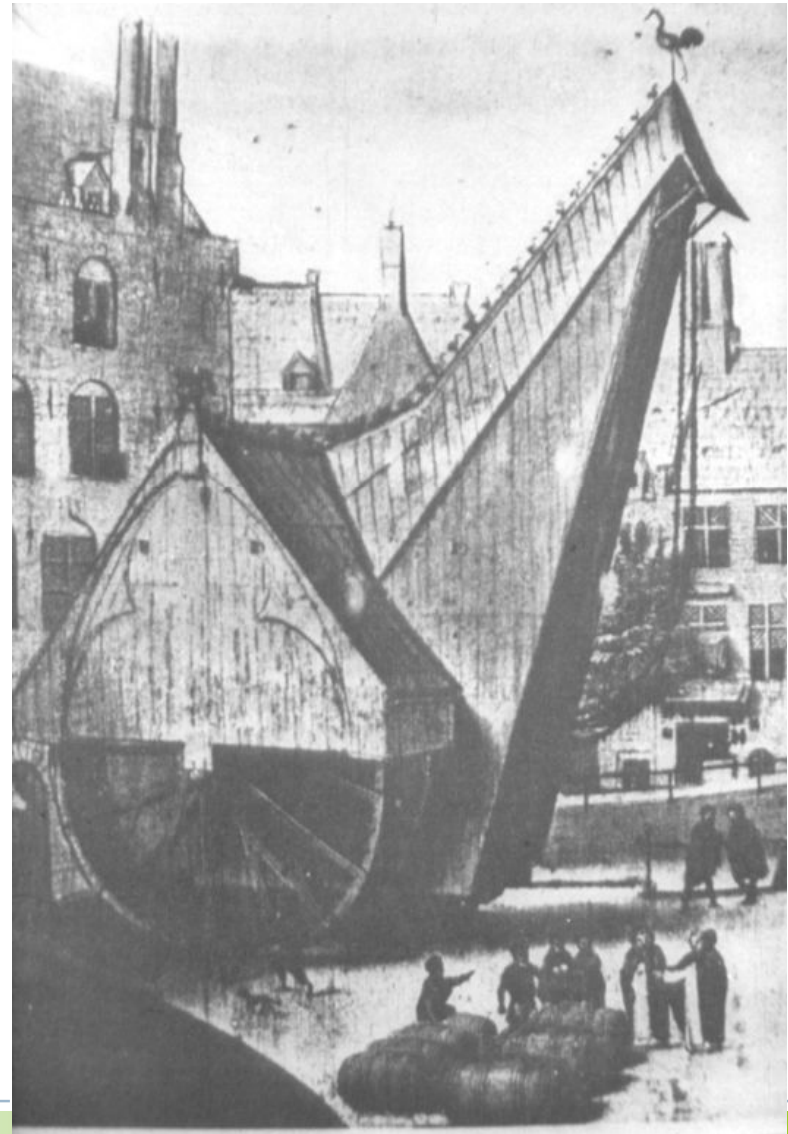
Antecedentes Generales

- El desarrollo de la humanidad desde la época de la Revolución Industrial se ha basado en un uso cada vez más intensivo de **máquinas**. En efecto, las máquinas son un verdadero **multiplicador** del esfuerzo humano. El trabajo (o función) que permite desarrollar una máquina es cientos de veces mayor que lo que puede realizar una persona. El trabajo que puede realizar una persona es del orden de los 100 a 140 Watts de potencia mecánica, cualquier máquina moderna puede realizar el trabajo de centenares, incluso miles de personas.



Antecedentes Generales

- La casi totalidad de los trabajos se hacían con energía muscular.
- Esto limitaba fuertemente las posibilidades de desarrollo.



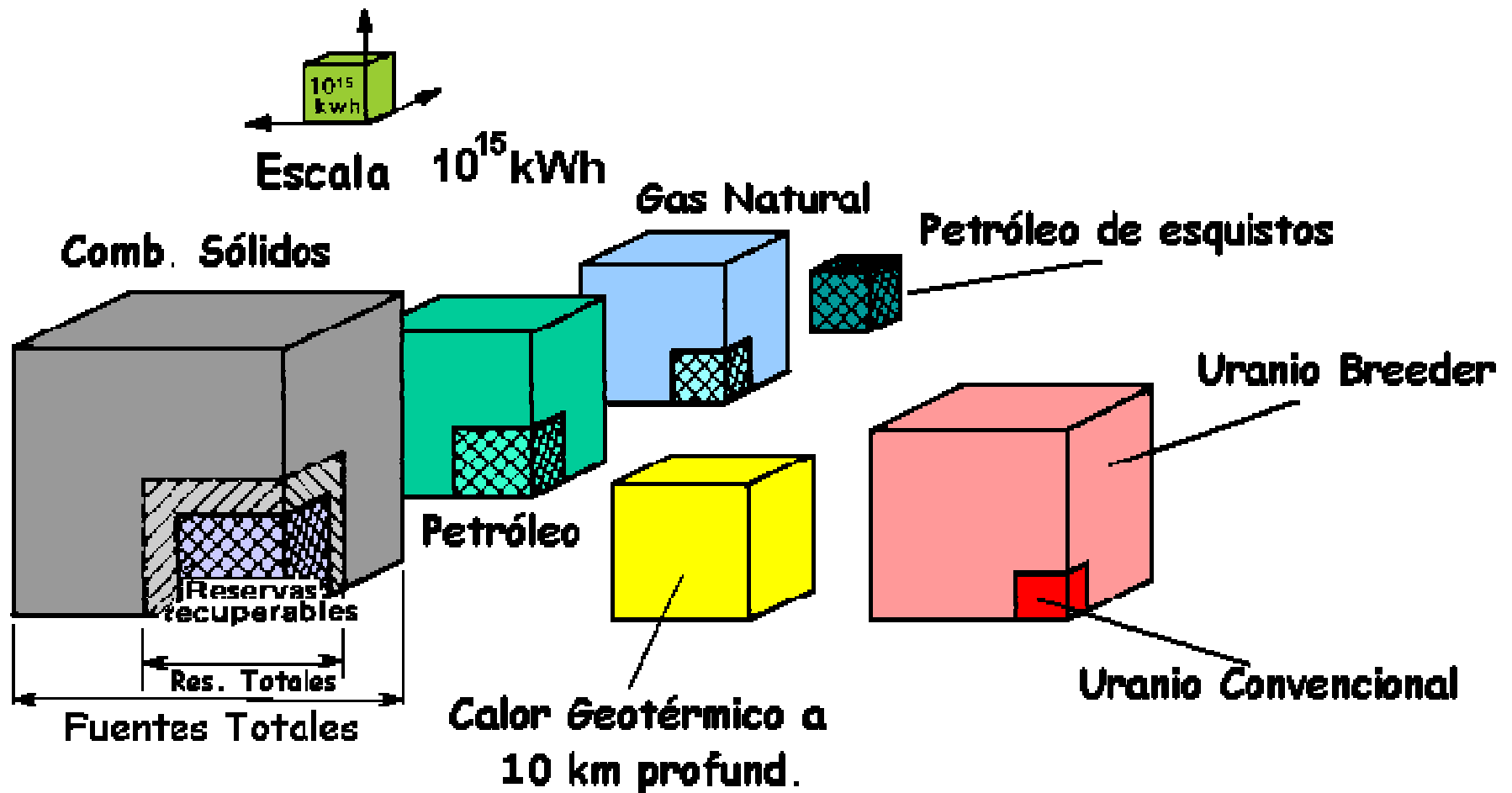
Antecedentes Generales

- Gran parte de la energía que hoy utilizamos viene de energías fósiles.
- Esto origina varios problemas:
- Limitación del recurso.
- Problemas de contaminación local.
- Problemas de contaminación global.

Situación de Recursos no Renovables

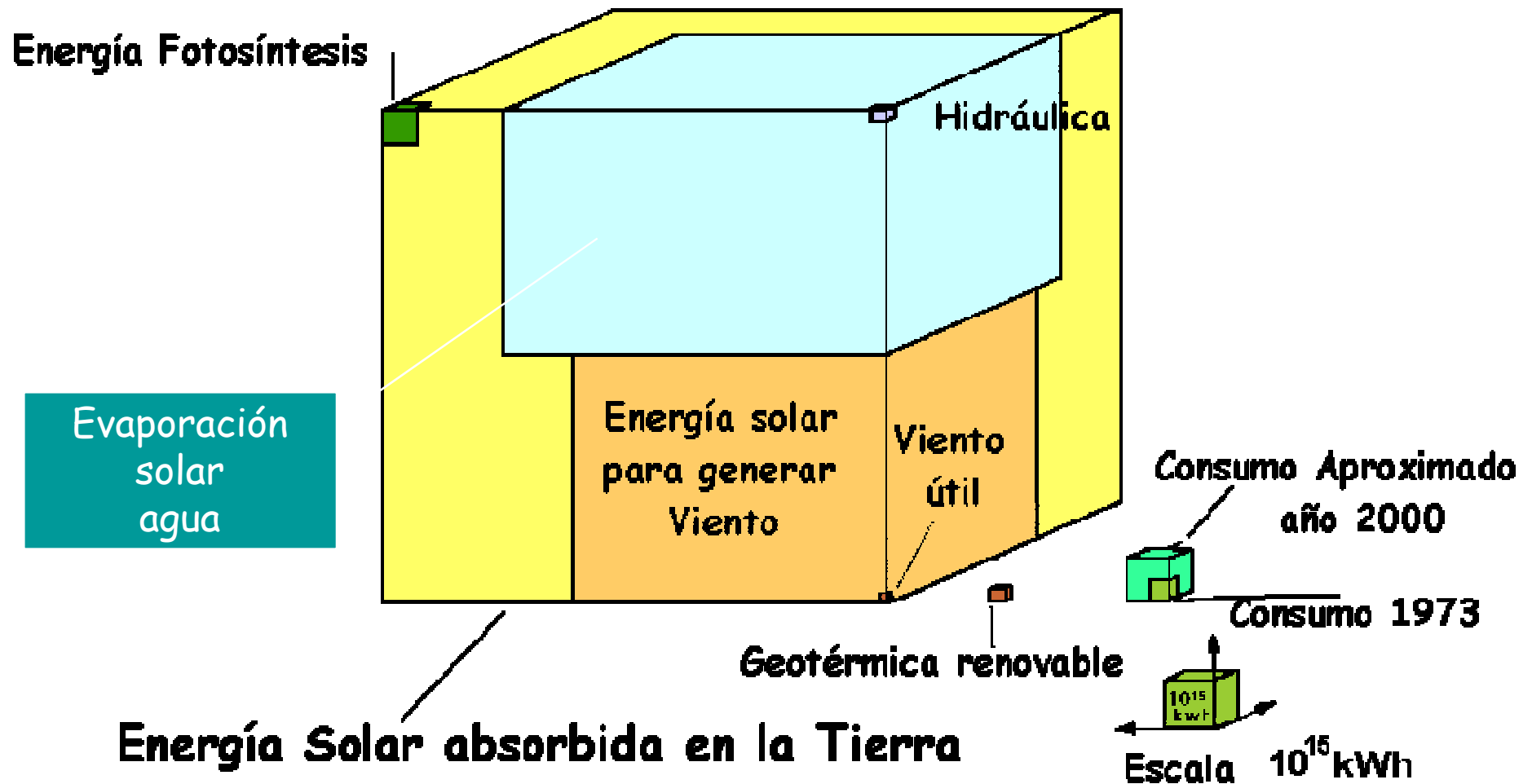
- Hoy día dependemos fundamentalmente de las fuentes no renovables de energía: petróleo, gas natural, energía nuclear.
- Veamos órdenes de magnitud relativos de las reservas totales estimadas:
 - Carbón: $8,65 \times 10^{16}$ kWh
 - Petróleo: $2,14 \times 10^{16}$ kWh
 - Gas Natural: $12,3 \times 10^{16}$ kWh
 - Fisión Nuclear (LWR): $5,18 \times 10^{14}$ kWh
 - Fisión (breeder): $3,2 \times 10^{16}$ kWh

Panorama Energético Mundial



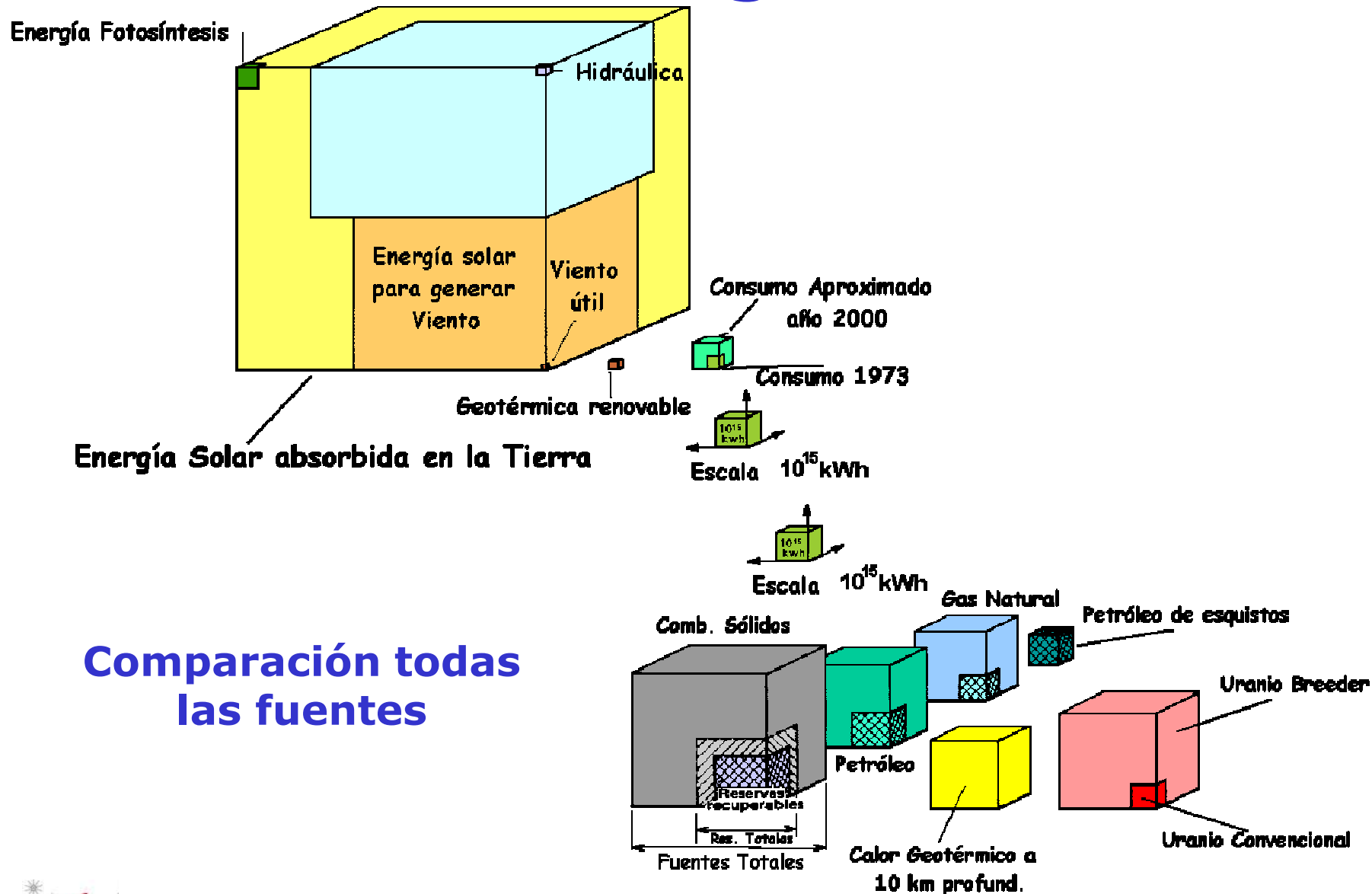
Comparación relativa entre fuentes no renovables

Panorama Energético Mundial

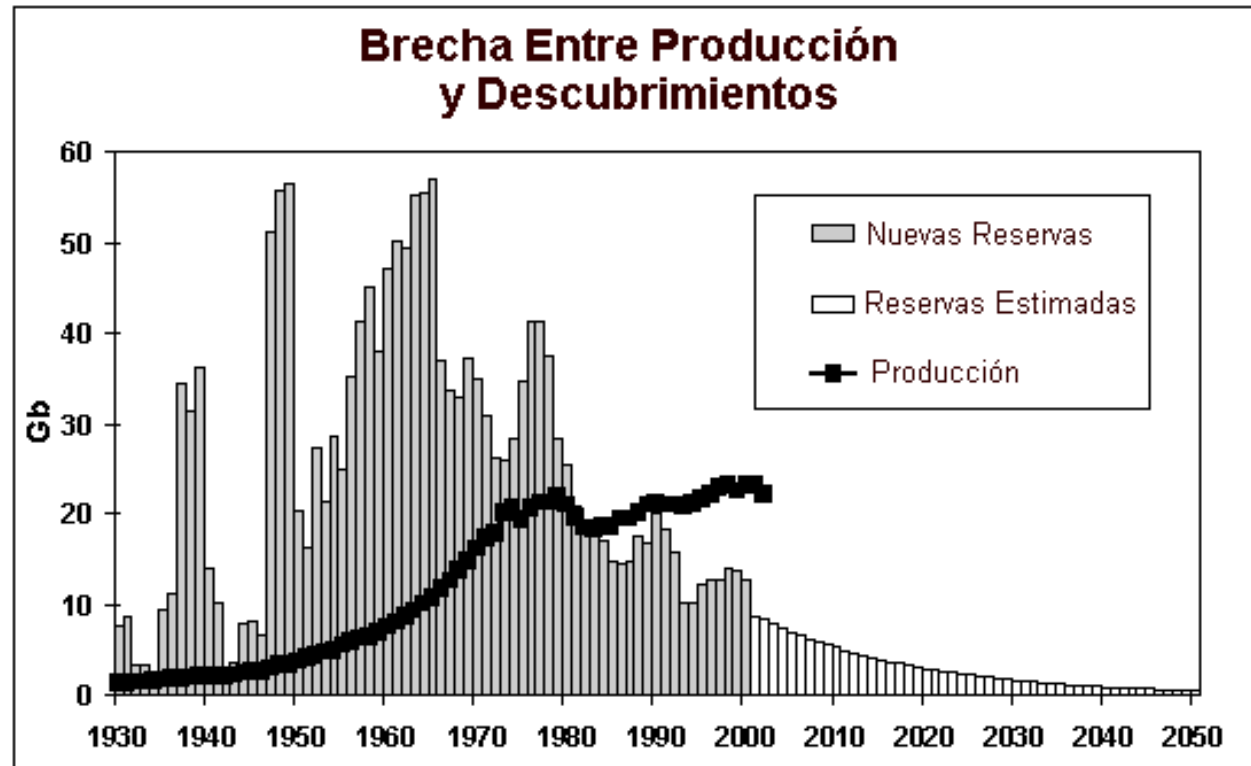


Comparación con fuentes renovables

Panorama Energético Mundial



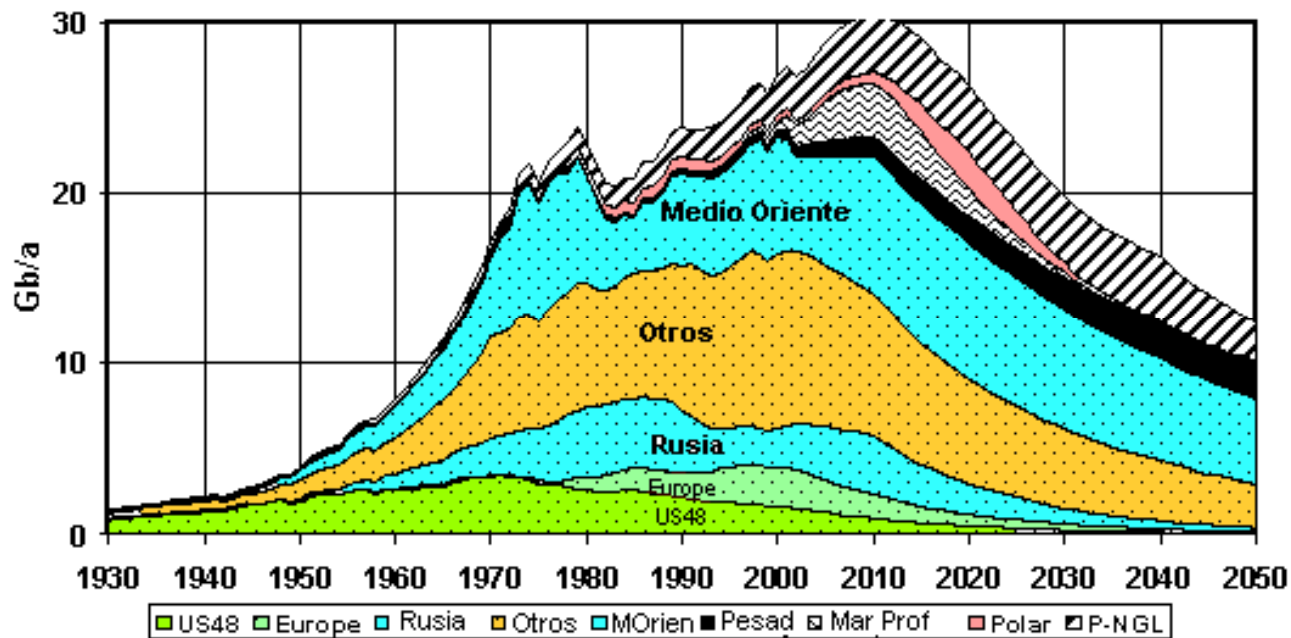
Desafío Energético en el Siglo XXI



Esta brecha indica que nuevas reservas de hidrocarburos son cada vez más escasas.

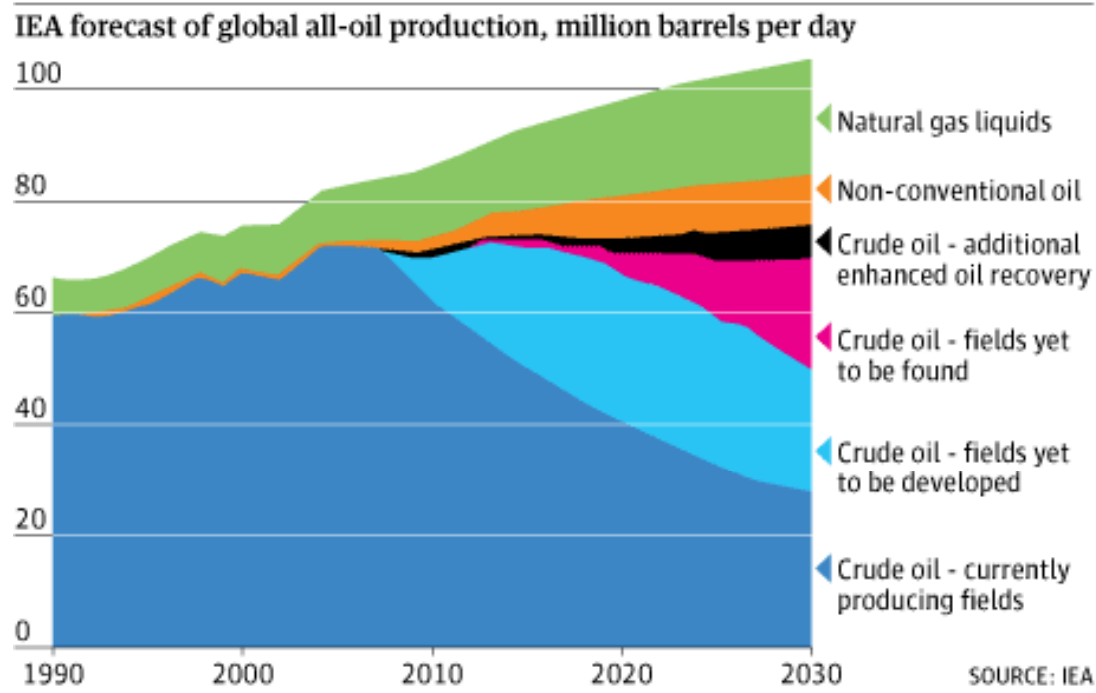
Desafío Energético en el Siglo XXI

Hidrocarburos Líquidos
Caso base 2003



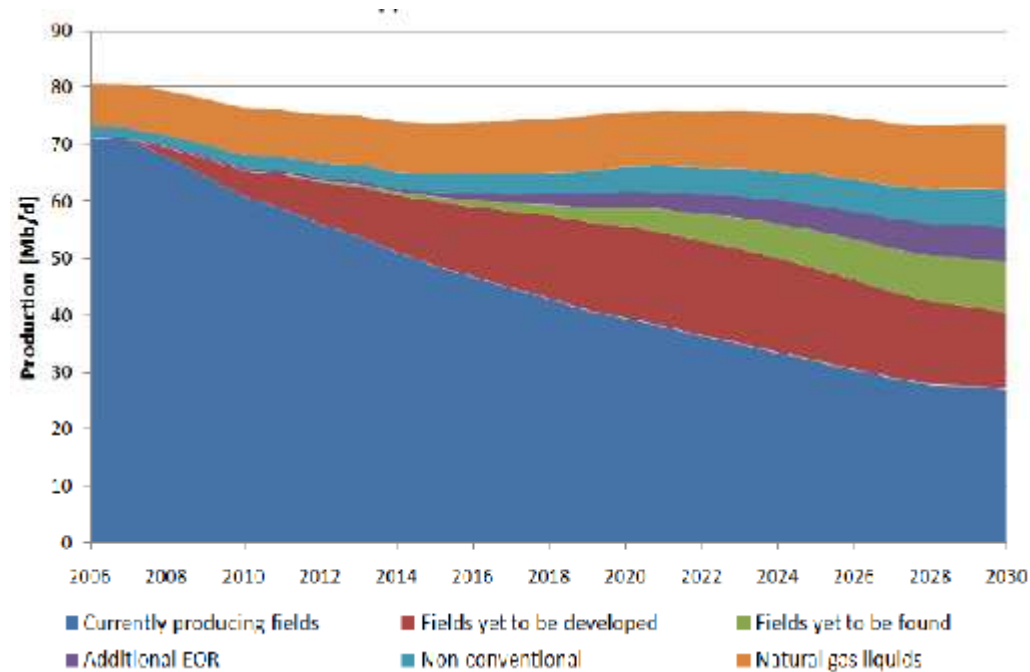
La mayor parte de los analistas coincide que, todo el planeta salvo Medio Oriente ha entrado en fase de producción decreciente ya...

Desafío Energético en el Siglo XXI



El informe de la IEA 2009 reafirma este preocupante cuadro

Desafío Energético en el Siglo XXI



La Universidad de Upsala (Suecia) analizó a fines de 2009 los datos del IEA “World Energy Outlook” y concluyó de que las cifras presentadas no eran realistas. Su nueva proyección ha sido publicada en Marzo de 2010

Situación Actual:

La incertidumbre de producción de petróleo dará lugar a una situación muy volátil de precios. La volatilidad activada por la situación económica mundial.

- ▶ **Petróleo:** situación volátil, con tendencia al alza a precios cercanos a los sustitutos.
- ▶ **Gas Natural:** se tenderá a ubicar a precios cercanos al petróleo por sus ventajas. Solo será más barato en lugares donde pueda llegar por gaseoducto.
- ▶ **Carbón:** también su precio ha subido. Existirá creciente presión por desplazarlo por altas emisiones de CO₂.

Recurso Solar:

Sin duda es el recurso energético más abundante sobre el planeta. Está en el origen de los combustibles fósiles y muchos ciclos naturales: ciclo del agua, ciclo del viento; ciclo de las corrientes marinas.

Es el motor que permite la vida.

De hecho somos “propulsados” por energía solar. Consumimos 2 kWh al día de energía solar de manera indirecta a través de los alimentos.

Conceptos Básicos de Energía

Unidades comunes son:

kilowatts: kW (1000 Watts); *Megawatts: MW* (1000 kW), *Gigawatts: GW* (1000 MW) etc.

Veamos algunos valores típicos de trabajo y potencia:

Un ser humano puede realizar un trabajo útil entre 0,5 y 0,7 kWh al día. La *potencia* que es capaz de generar en períodos largos de tiempo es del orden de 100 a 150 Watts.

1 kWh = 3,6 MJ

Una pila alcalina de 1,5 Volts es capaz de generar unos 2000 mAh = 3 Wh = $3,6 \times 3 \text{ kJ} = 10,8 \text{ kJ} = 0,003 \text{ kWh}$.

El costo del kWh doméstico es del orden de los \$150.

El costo del kWh de kerosene es del orden de \$50

Energía Solar – Aspectos Históricos

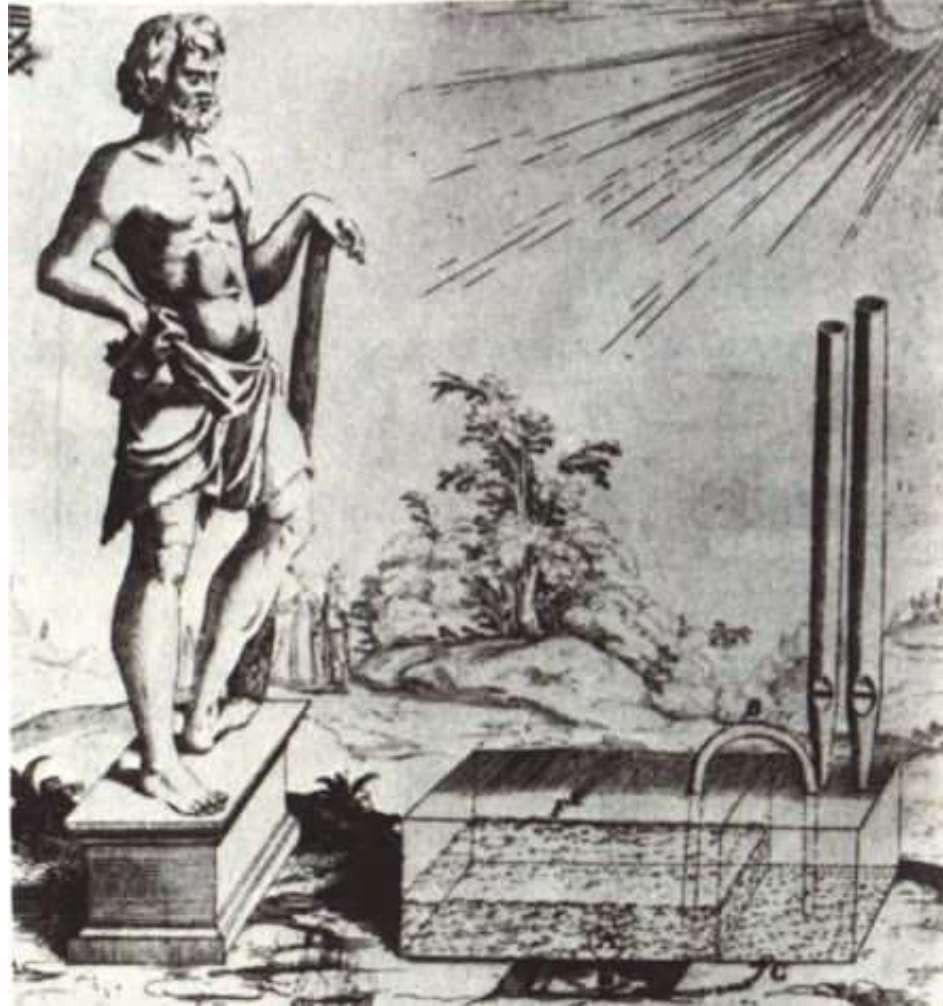
La utilización de energía solar es de Larga data

- **Griegos:** Conocido es la historia de cómo Arquímedes destruyó la flota romana que sitiaba a Siracusa mediante el uso de espejos que concentraron la radiación solar.
- **Romanos y Griegos:** Supieron utilizar ganancia solar para disminuir cargas térmicas en casas y termas. Además el conocimiento les sirvió para diseñar ciudades. Gran parte de este conocimiento quedó en los trabajos de Vitrubio.

Antes del Siglo XIX

- **Fuentes:** Se hicieron interesantes experimentos en la construcción de fuentes y artefactos que aprovechaban el calor solar.
- **Efecto Invernadero:** Horace de Saussure hizo trabajos pioneros sobre el efecto invernadero. Además construyó las primeras cocinas solares en el Siglo XVIII.
- **Concentradores:** Hubo gran interés por espejos concentradores en los siglos XVII y XVIII.- El caso más notable fueron los trabajos de Lavoisier

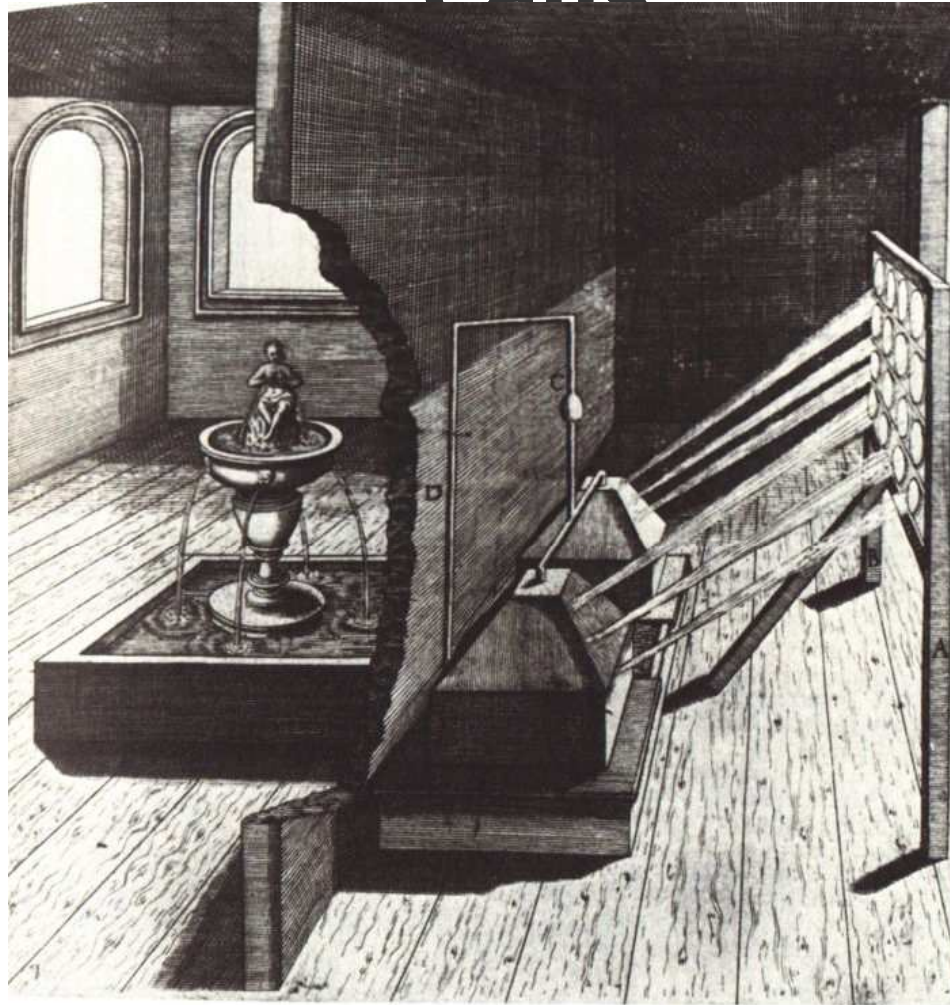
Fuentes Solares: Salomon de Caus



Primeras experiencias para convertir calor solar en trabajo útil. Siglo XVII.

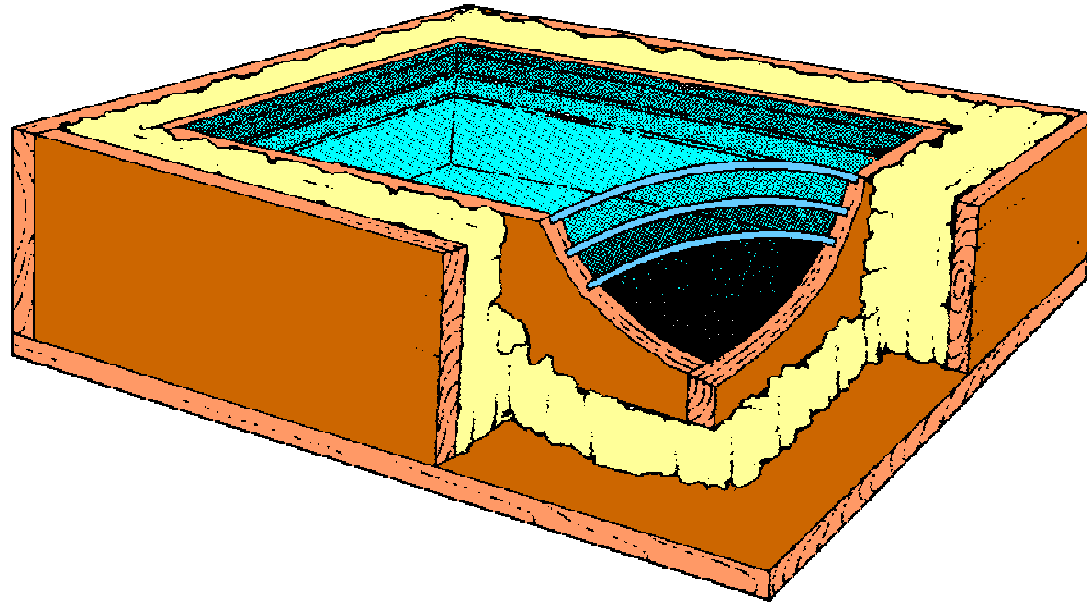
Fuentes Solares: Salomon de

Caus



Primeras experiencias para convertir calor solar en trabajo útil. Siglo XVII.

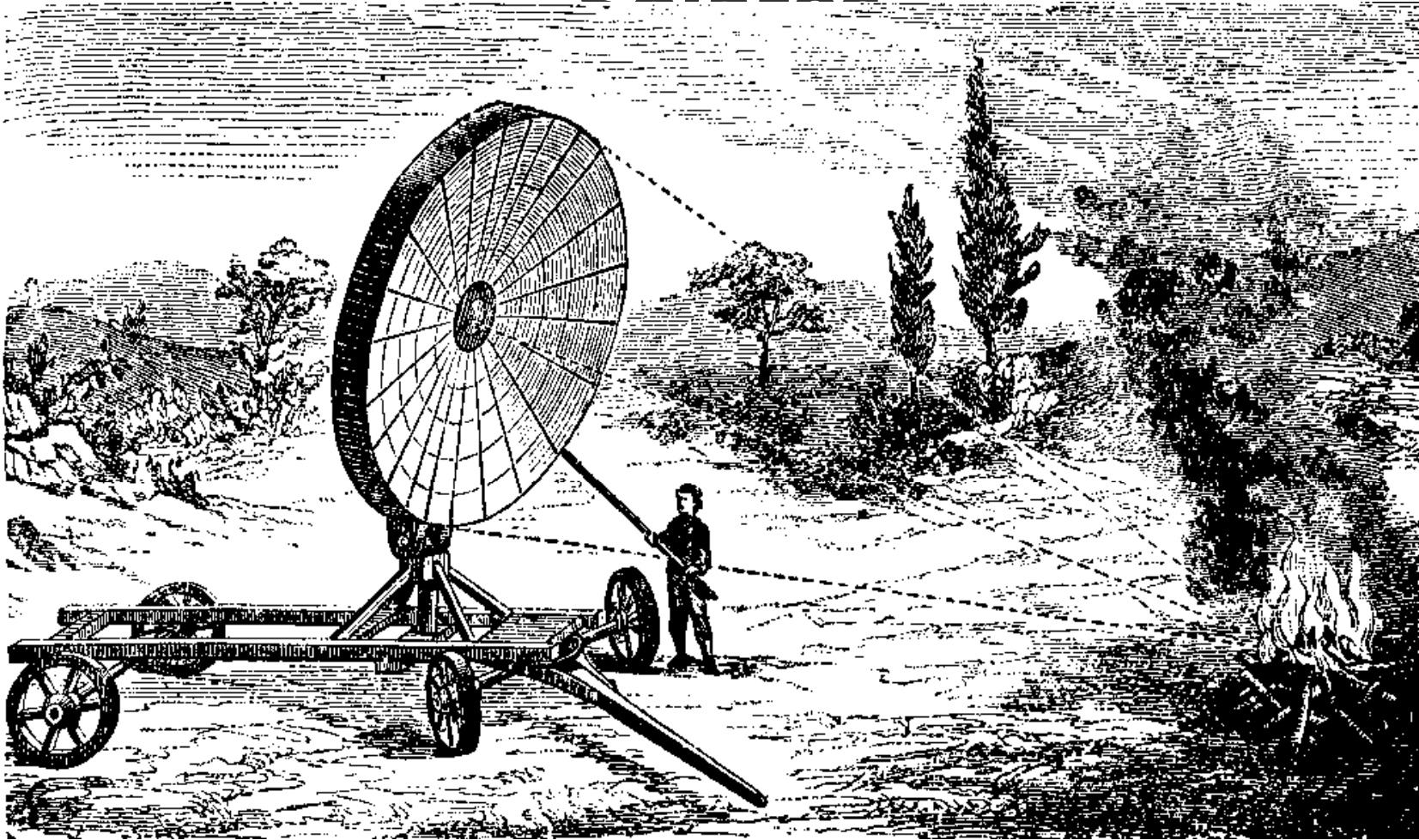
Efecto Invernadero: de Saussure



Hizo pruebas en Monte Blanco, son primeros trabajos que permiten estimar la magnitud de radiación solar.

Además experimentos llevaron a cocción de alimentos.

Siglo XVII: Concentradores Solares



Hubo muchos experimentos de hornos solares. Aquí se ilustra el trabajo de HOESEN (Holandés).

Siglo XVII: Hornos Solares, Lavoisier

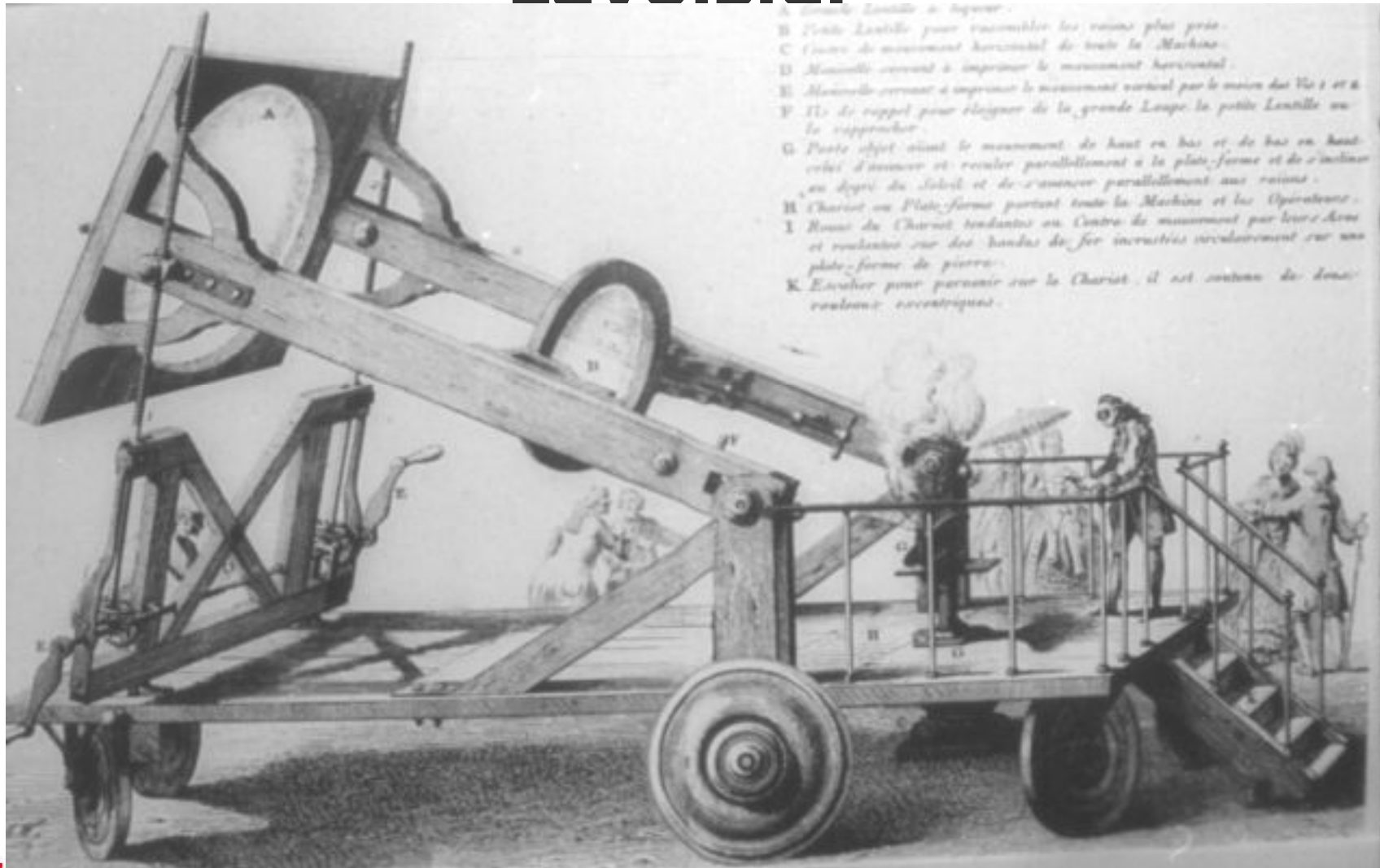
Antoine de Lavoisier hizo importantes trabajos en física utilizando hornos solares como fuente de calor. En particular:

- Demostró principio de conservación de la masa.
- Demostró que el diamante estaba hecho de carbón.
- Fundió platino.



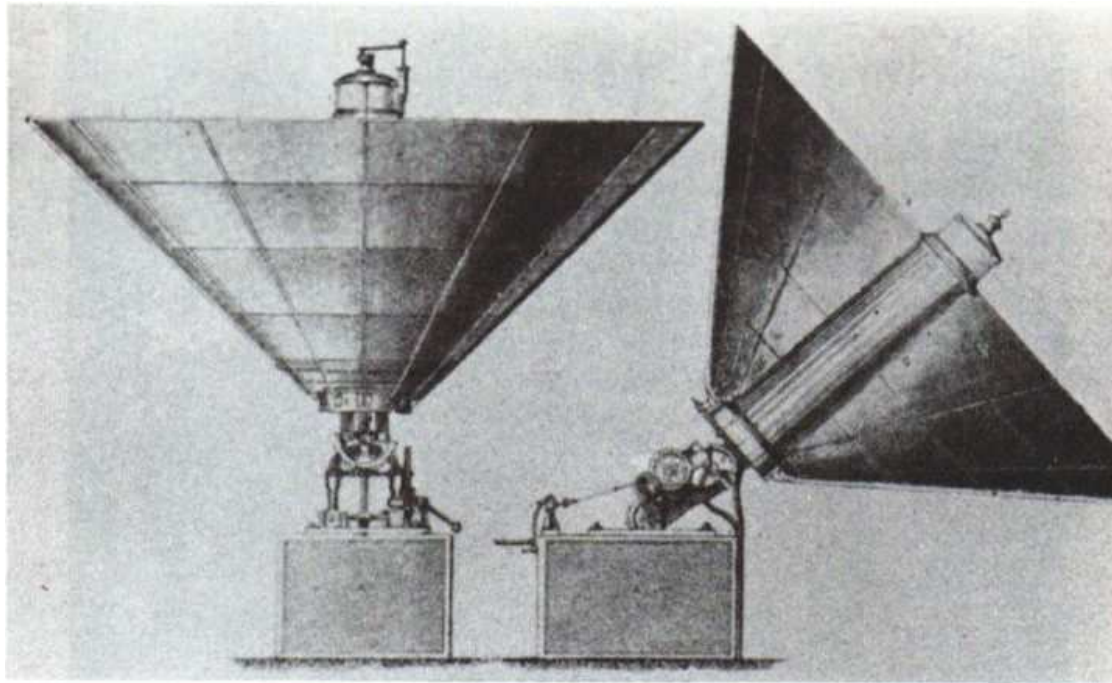
Se ilustra un espejo solar de Lavoisier. Pero su horno era espectacular

Siglo XVII: Hornos Solares, Lavoisier



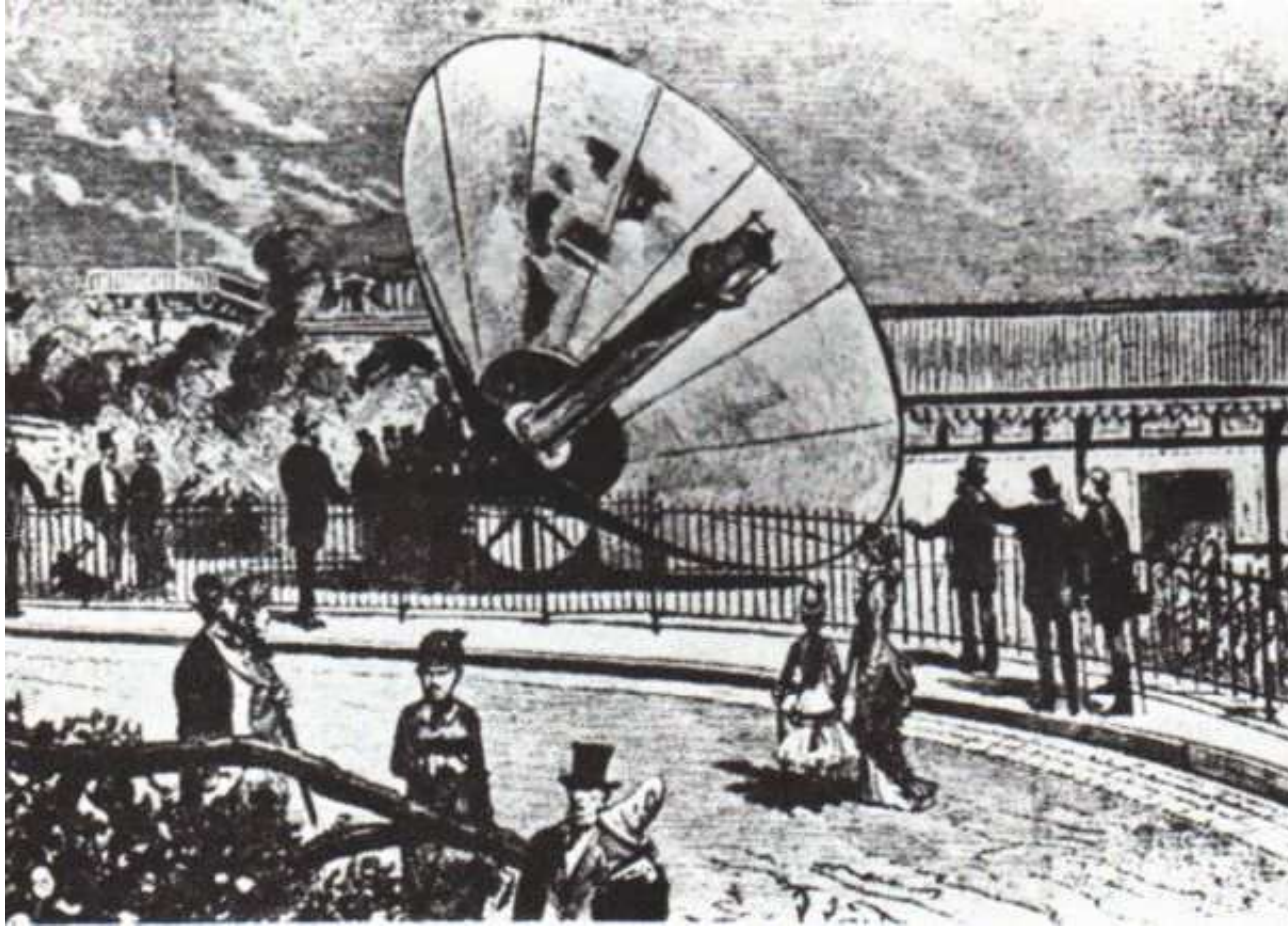
Siglo XIX: Motores Solares, Mouchot

Auguste Mouchot puede de verdad ser considerado el padre de los motores solares. Hizo numerosos experimentos y fabricó varios motores, desde potencias muy pequeñas hasta varios kilowatts de potencia real.



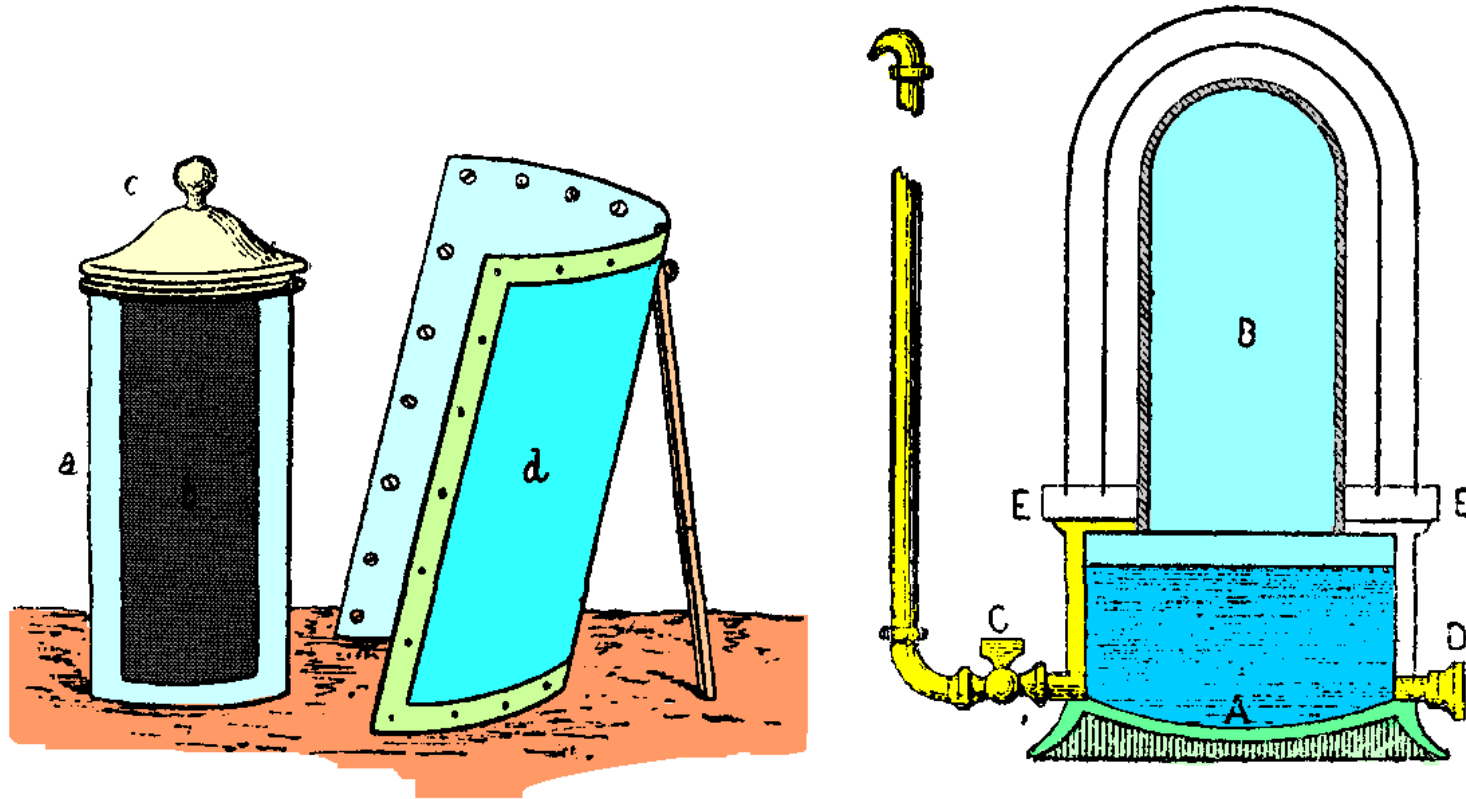
En el Siglo XIX la energía solar era opción real frente al carbón. Especialmente en lugares con alta radiación. Mouchot apuntó a trabajar con espejos cónicos.

Siglo XIX: Motores Solares, Mouchot



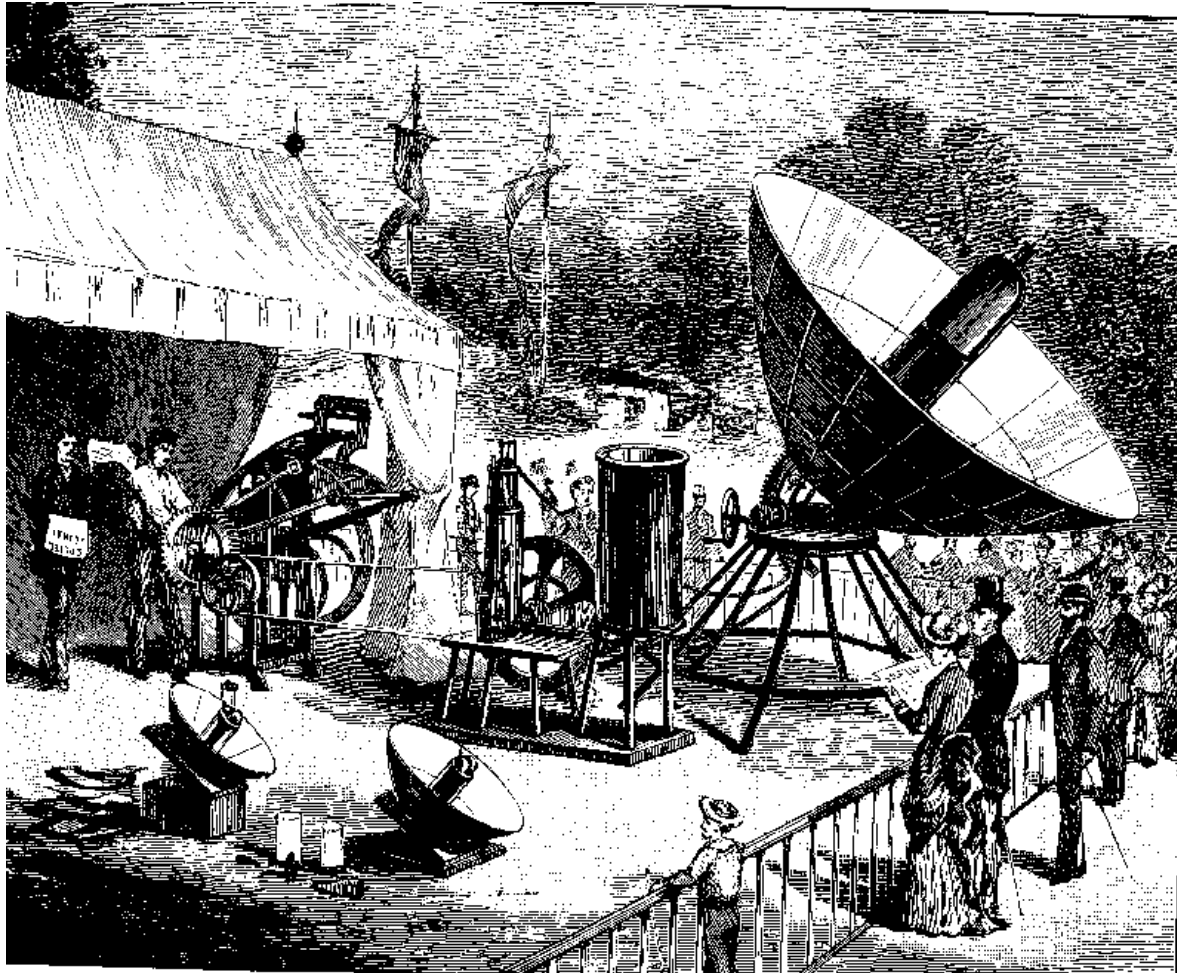
Su máquina de mayor tamaño la construyó en Tours, Francia. Quería llenar de motores solares a Egipto.

Siglo XIX: Cocinas Solares, Mouchot



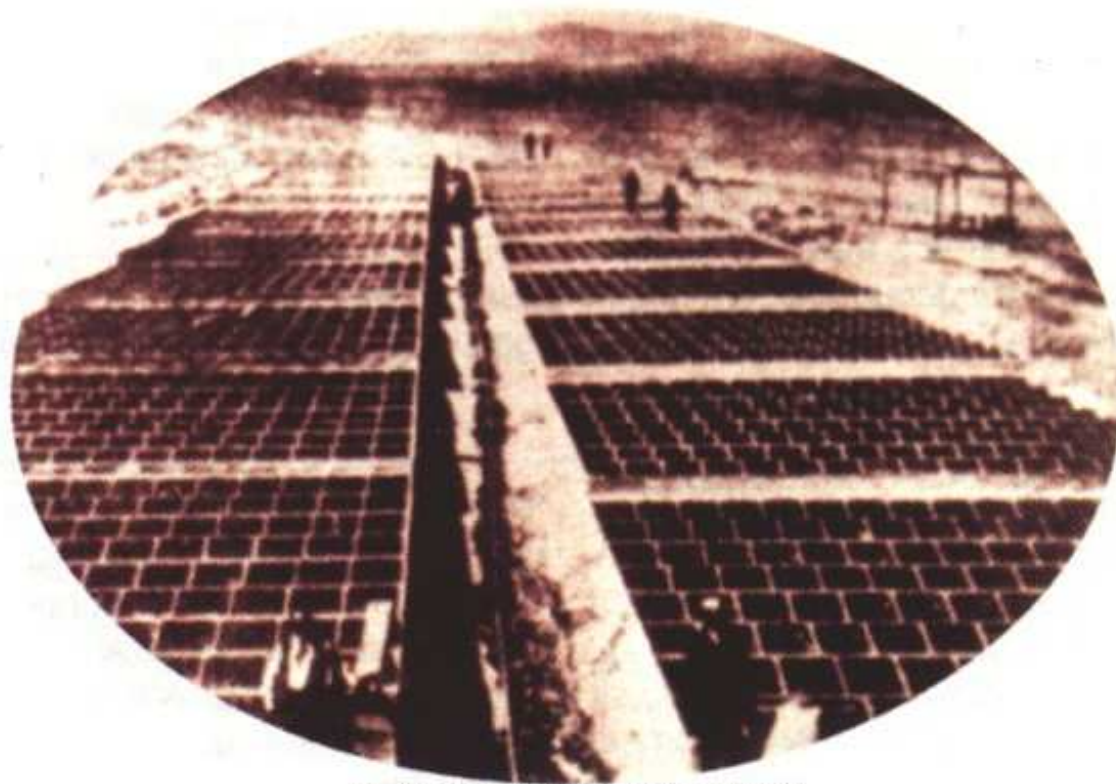
Además construyó cocinas solares y destiló brandy con energía solar.

Siglo XIX: Motor Solar, Abel Pifre



Un discípulo de Mouchot fue Abel Pifre, quién editó un periódico ("Le Soleil") en la feria mundial de Paris donde se inauguró la Torre Eiffel.

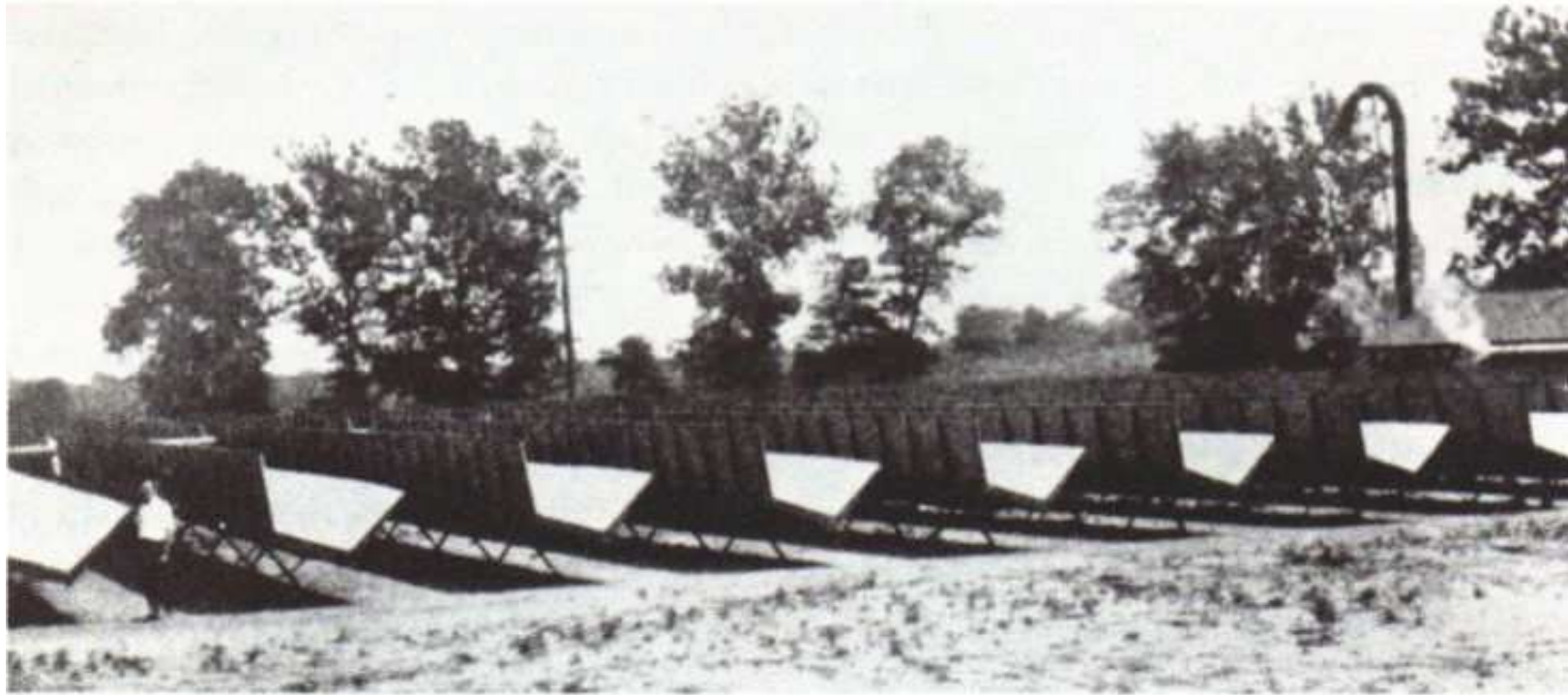
Siglo XIX: Destilador Solar: Charles Wilson



Destilador Solar de Las Salinas (Chile)

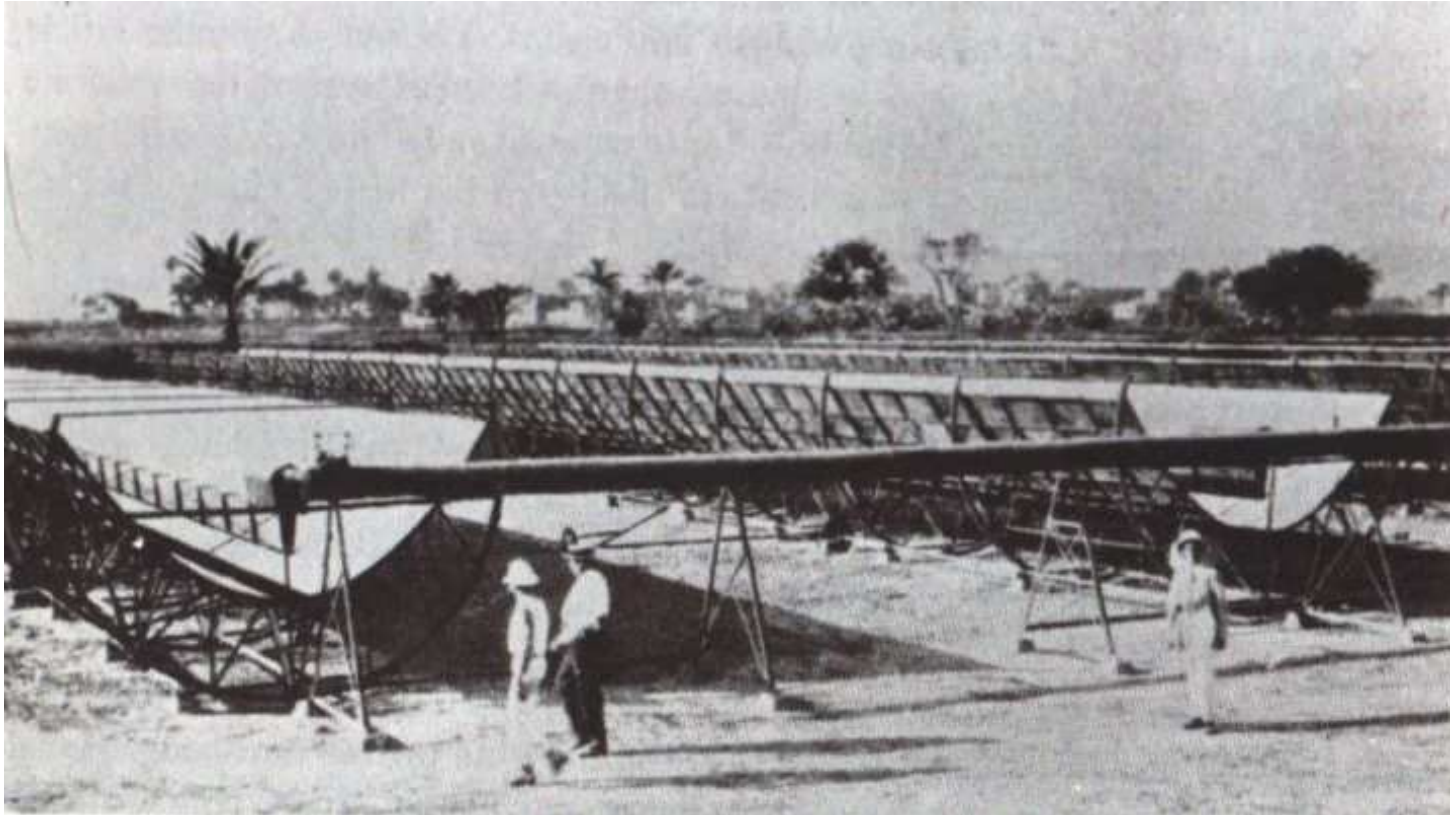
Otro pionero de gran importancia fue Charles Wilson. En 1872 construyó un gran destilador solar en Las Salinas (cerca de Chacabuco), Chile. Producía más de 20.000 litros de agua dulce al día y se utilizó al menos hasta 1912.

Siglo XIX: Motores Solares: Shuman y Boys



Estos pioneros construyeron toda una serie de motores solares que culminó con una gran planta en Egipto. Esta es foto de motor con colectores planos en Tacony New York.

Siglo XIX y XX: Motores Solares: Shuman y Boys



Una vista de la planta de Meadi (Cairo, Egipto). Los concentradores eran cilindro parabólicos, orientación este oeste. Siguen el sol en altura. 50 HP de potencia, para irrigación.

Siglo XIX as XX: Motores Solares: Shuman y Boys



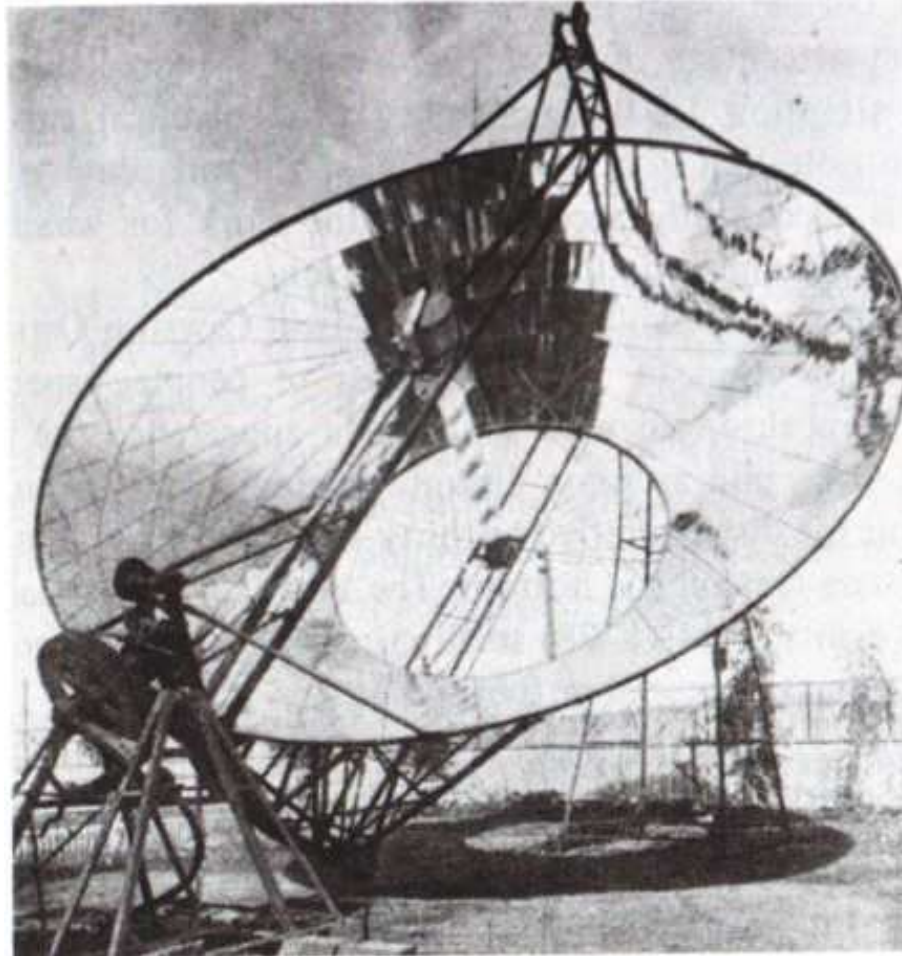
Otra vista de la planta de Egipto. Estuvo en operación hasta los inicios de la primera guerra mundial

Siglo XX: Motores Solares: Tellier



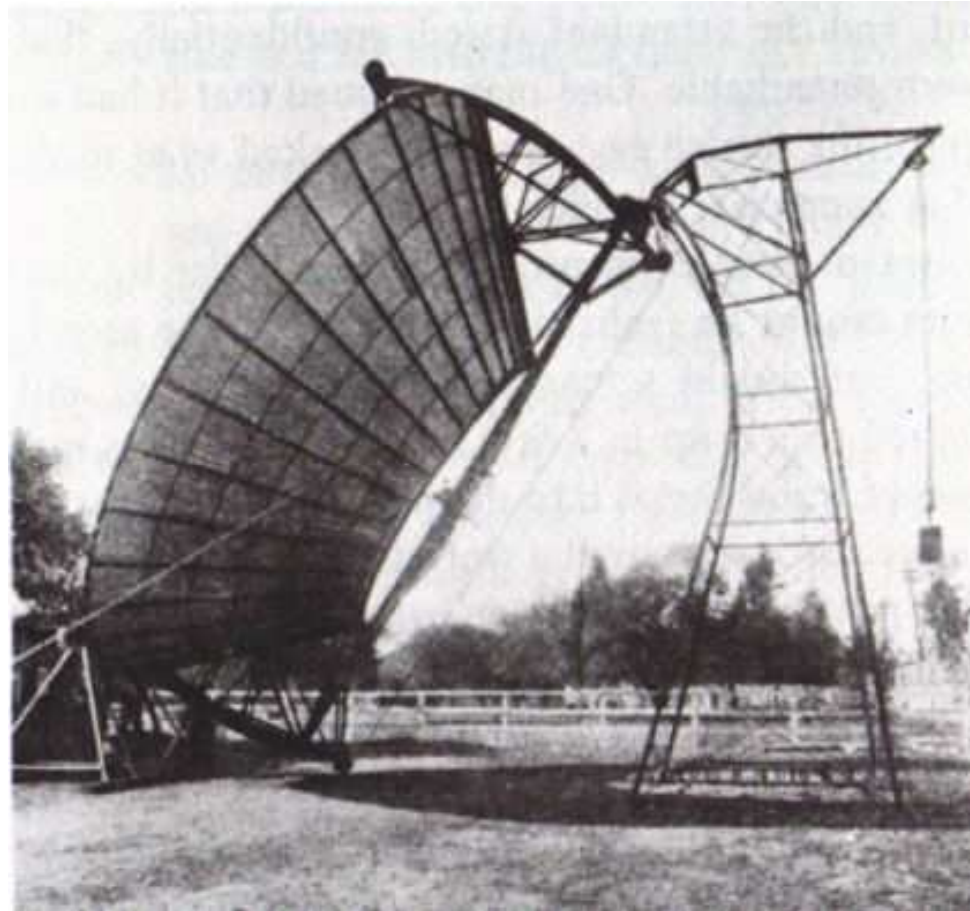
El concepto fue utilizar colectores planos y costos muy bajos (bajo gradiente térmico).

Siglo XX: Motores Solares: Eneas



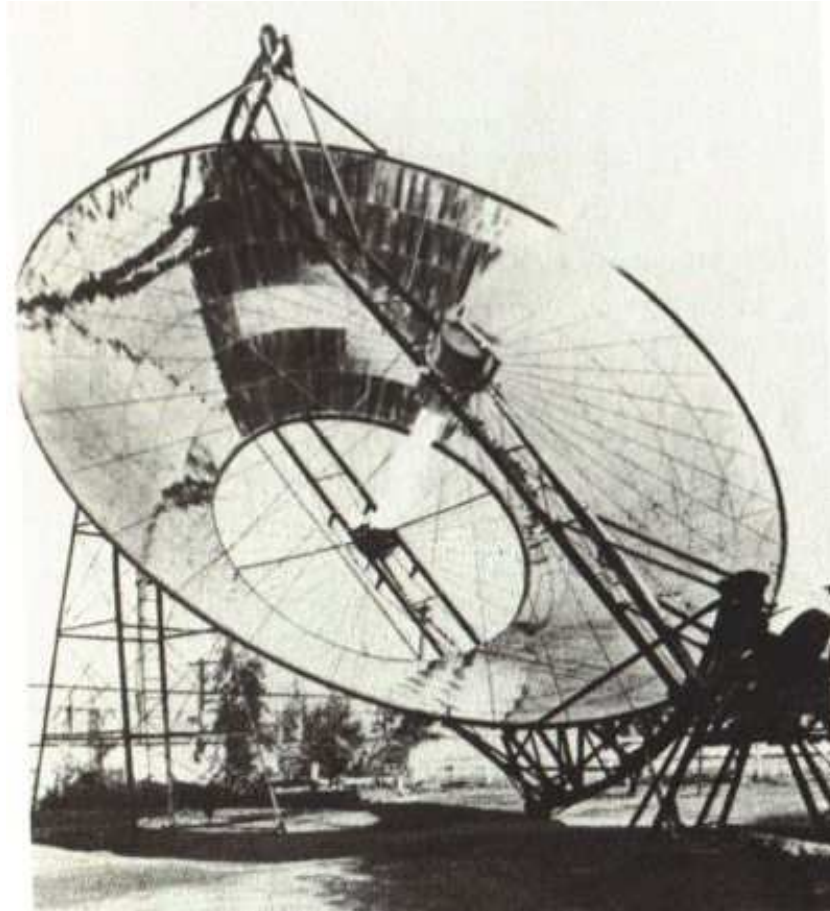
Aparece aquí nuevamente el concentrador cónico. Es motor para bombear agua, de aproximadamente 5 HP de potencia. Se fabricaron bastantes unidades.

Siglo XX: Motores Solares: Eneas



Aparece aquí nuevamente el concentrador cónico. Es motor para bombear agua, de aproximadamente 5 HP de potencia. Se fabricaron bastantes unidades.

Siglo XX: Motores Solares: Eneas



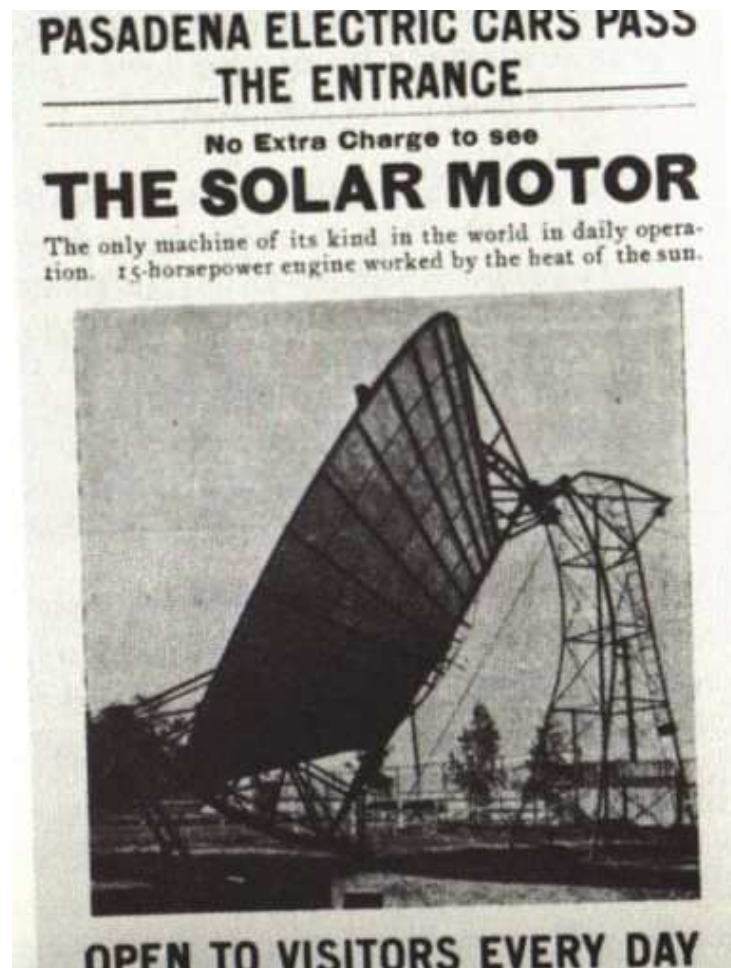
Aparece aquí nuevamente el concentrador cónico. Es motor para bombear agua, de aproximadamente 5 HP de potencia. Se fabricaron bastantes unidades.

Siglo XX: Motores Solares: Eneas



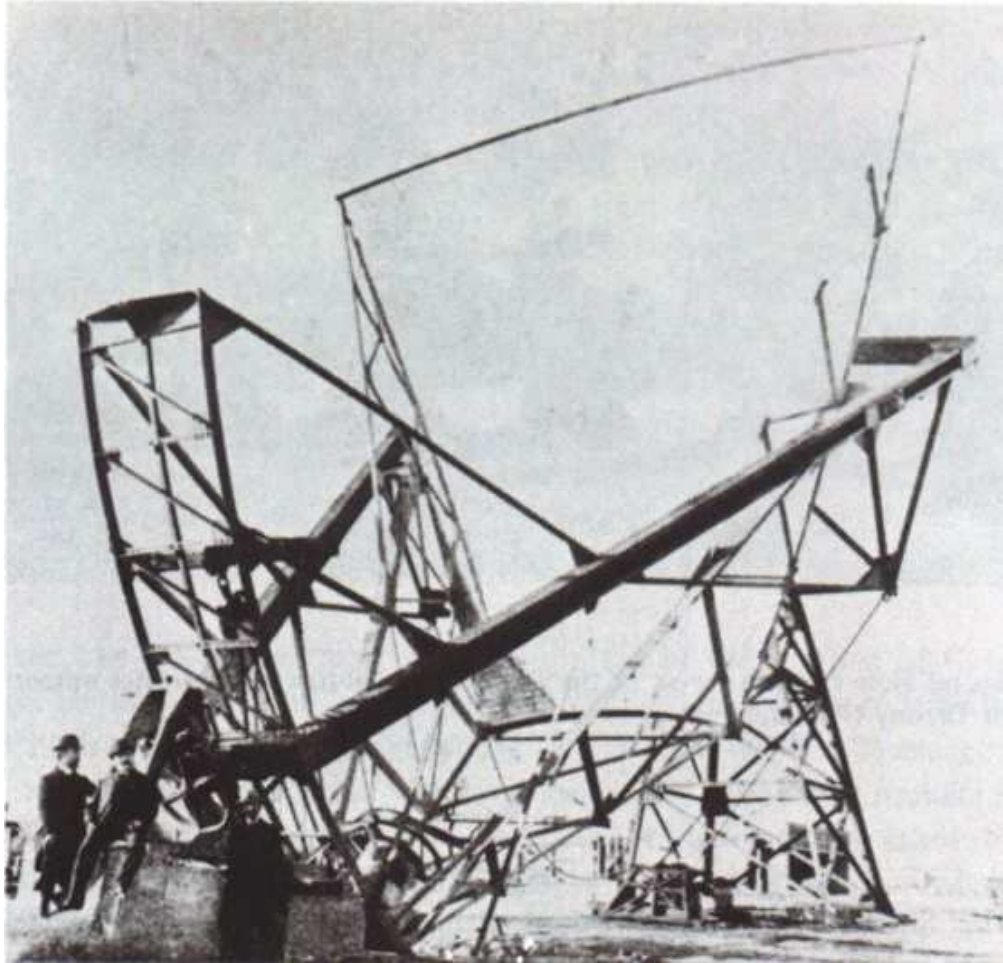
El inventor en su invento.

Siglo XX: Motores Solares: Eneas



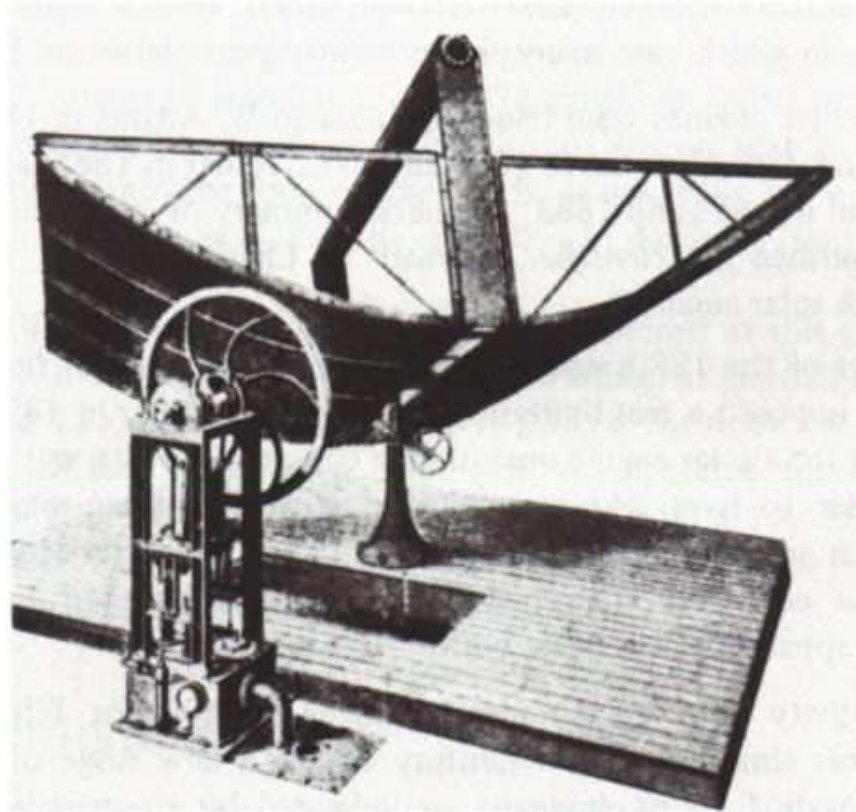
Publicidad de la época.

Siglo XX: Hornos Solares: El Padre Himalaya



Horno solar de investigación de inicios del Siglo XX.

Siglo XIX: Motores Solares: Ericsson



Otro pionero fue Ericsson.

Conclusiones: Los Pioneros

Los pioneros percibieron al sol como una fuente limpia e inagotable de energía. Además es perfectamente competitivo frente al carbón.

El petróleo atrasó la energía solar. Hoy, ante la incertidumbre sobre lo que ocurrirá con el petróleo, esta opción nuevamente está abierta.

Radiación:

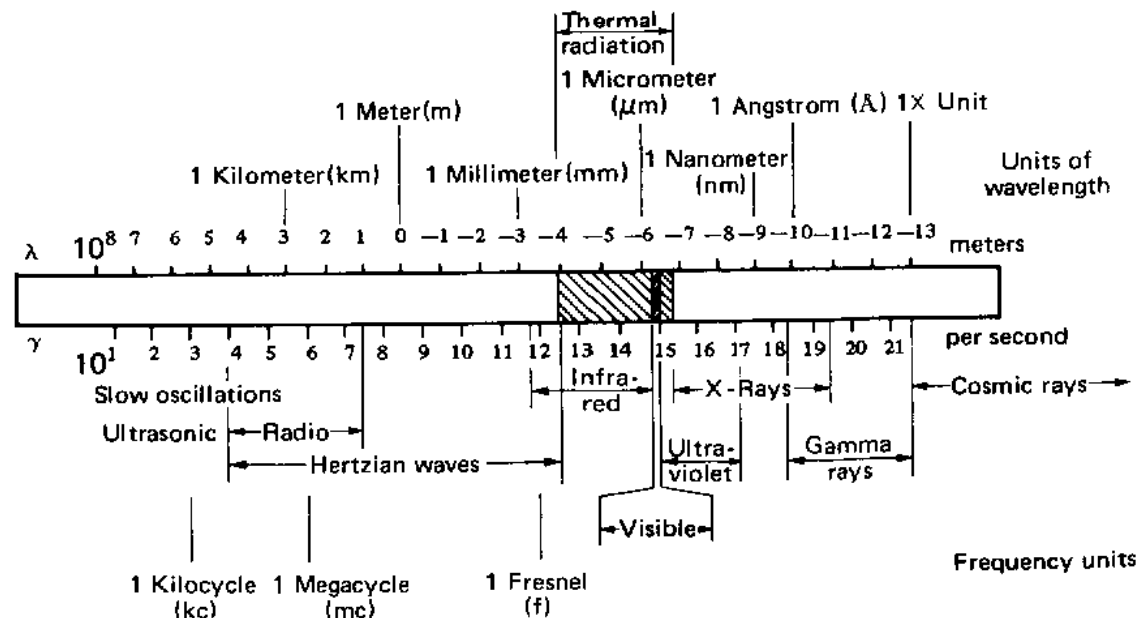
De los fenómenos de transferencia de calor, la radiación es uno de los menos conocidos por el común de las personas. Sin embargo su influencia es sumamente importante. En efecto, un ventanal mal orientado puede producir una ganancia térmica de cerca de 800 a 900 [W/m²], las pérdidas por radiación de sistemas mal aislados pueden ser varias centenas de Watts por metro cuadrado y la pérdida de energía hacia el espacio en el norte de Chile puede exceder los 250 [W/m²]. En este párrafo presentaremos los elementos más básicos relativos a la radiación. Siempre lo haremos en el contexto planteado en este curso.

- Naturaleza de la radiación y su magnitud.
- Cuerpo negro, cuerpo gris y ecuaciones básicas de radiación.
- Radiación solar, radiación térmica y radiación terrestre.

Naturaleza de Radiación:

A diferencia de la conducción y convección, la radiación no necesita un medio material para su transmisión. Su esencia es de *radiación electromagnética*, del todo similar a las ondas de radio o las ondas de luz.

La radiación electromagnética cubre un *espectro* que va de longitudes de onda muy cortas (centésimas de micrón o menos), hasta las longitudes de onda correspondientes a centenares de metros.



Naturaleza de Radiación:

Dentro de las posibles longitudes de onda de la radiación electromagnética, nos va a interesar en especial:

- El rango de la *radiación solar*. Esto por ser la radiación que llega del sol. Cubre longitudes de onda de 0,3 a 2,5 μm (micrones).
- El rango de la *radiación térmica*. Es decir la producida por cuerpos calientes. Esta cubre longitudes de onda típicamente de 2,5 a 80 μm o más.

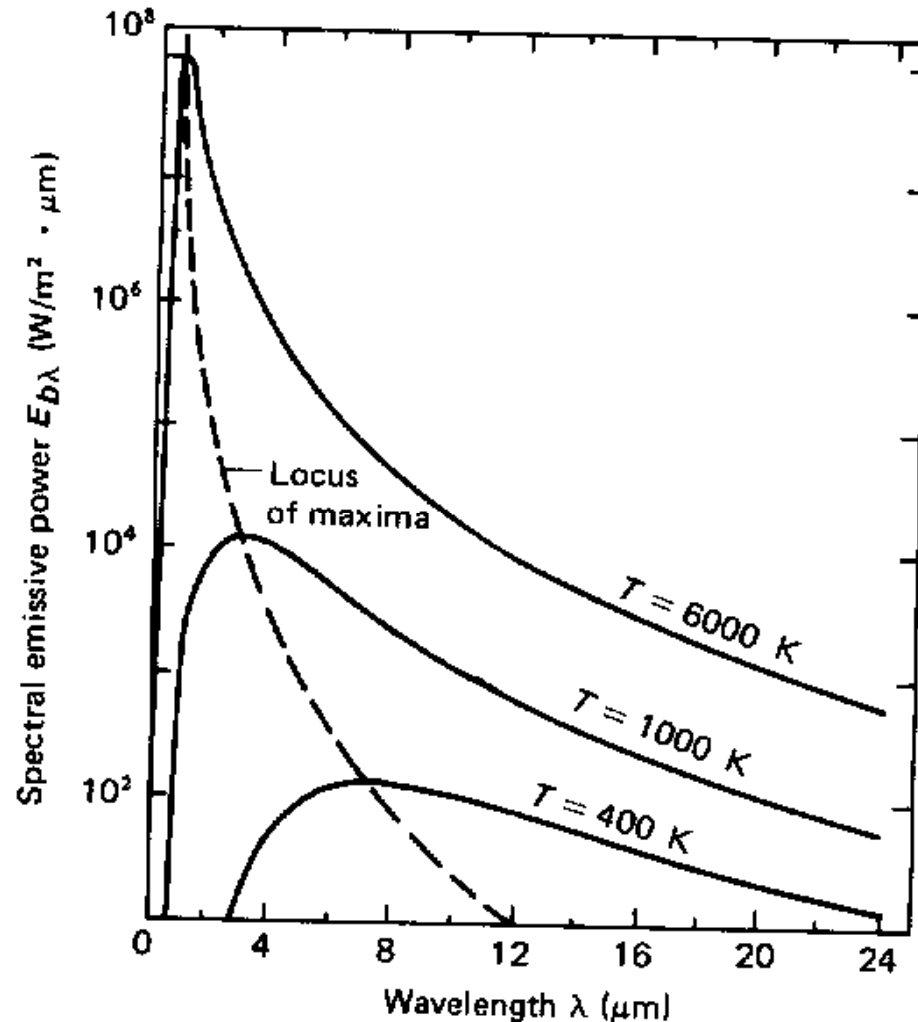
Ecuaciones Básicas de Radiación:

Lo primero que hay que tener presente es que *todo cuerpo que está a una temperatura mayor de 0°K , emite radiación electromagnética.*

La *cantidad* de energía emitida es función de la temperatura del cuerpo, de sus propiedades ópticas y de la llamada *Constante de Stefan Boltzmann.*

La energía emitida no es constante para cualquier longitud de onda. De hecho, la radiación se emite según un cierto *espectro*, cuya forma y magnitud varía de acuerdo a la temperatura del cuerpo.

Ecuaciones Básicas de Radiación:



Ecuaciones Básicas de Radiación:

Existe un cuerpo que es capaz de emitir o absorber el máximo de energía a cualquier longitud de onda. Se le conoce como *Cuerpo Negro*. Tiene la propiedad que:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = 1$$

para todo λ

Además existe el cuerpo ópticamente *gris*. Este tiene la propiedad que:

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = Cte < 1$$

para todo λ

Ecuaciones Básicas de Radiación:

En realidad no existen ni cuerpos negros ni grises. Si bien la absorptividad varía a distintas longitudes de onda, ocurre que para ciertos *rangos* de longitudes de onda, un cuerpo real se puede asimilar a un cuerpo gris.

En primer lugar el intercambio radiativo entre dos cuerpos:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Con ε la emisividad del cuerpo y σ , la constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)]$

Ecuaciones Básicas de Radiación:

La *forma* y rango espectral que cubre la radiación emitida por un cuerpo gris está dada por las relaciones de *Wien*. Estas dicen que:

$$\lambda_M = \frac{2890}{T} [\mu m]$$

Es decir, la longitud de onda a la cual se produce máxima emisión energética de un cuerpo negro (o gris) es $2890/T$ [μm] de longitud de onda. Además se cumple que más del 95% de la energía emitida está en el rango de longitudes de onda λ_1 y λ_2 , tal que:

Ecuaciones Básicas de Radiación:

$$\lambda_1 = 0,5 \cdot \lambda_M$$

$$\lambda_2 = 8,0 \cdot \lambda_M$$

Estas relaciones nos permiten calcular en forma aproximada la cantidad de energía emitida por un cuerpo radiativo, además de la forma de su espectro de radiación.

No olvidar:

- La radiación solar llega a la tierra en el rango de 0,3 a 2,5 μm . Este es la zona del *Espectro Solar*
- La radiación infrarroja térmica está en el rango de 2,5 a 80 μm . Este es el espectro *Infrarrojo Térmico*.

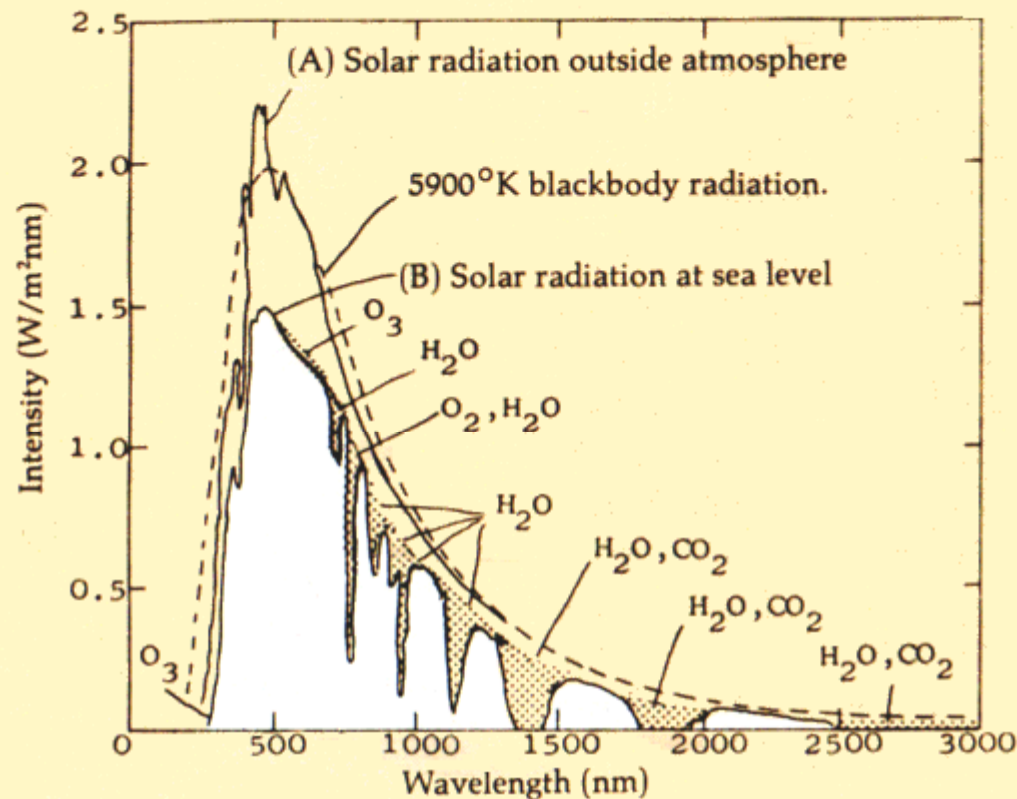
Naturaleza de Radiación:

En la siguiente figura se ilustra el espectro solar extraterrestre y el espectro solar a nivel de mar.

De esta figura queda claro que, a nivel de la tierra, el espectro de radiación que llega del sol cubre un rango aproximado de 0,3 a 2,5 [μm] de longitud de onda. Además este espectro tiene fuertes bandas de absorción, producto del Ozono atmosférico, CO_2 y vapor de agua.

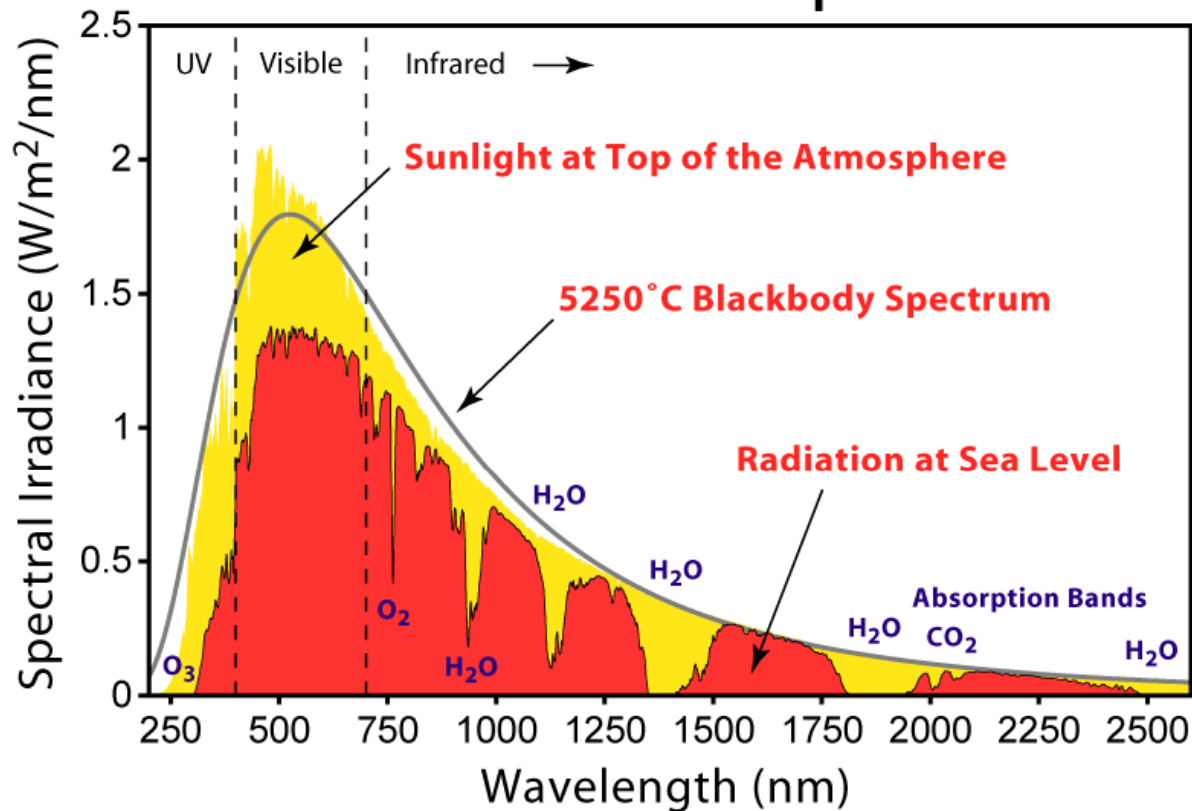
Para cuerpos que están a temperaturas en torno a la temperatura ambiente (290°K), su rango de emisión térmica está con un máximo en torno a los 10 [μm] y cubre un rango de 5 a 80 [μm] de longitud de onda.

Naturaleza de Radiación:



The intensity of solar radiation at different wavelengths: (A) outside the Earth's atmosphere, and (B) at the Earth's surface (sea level). The dips in curve (B) indicate absorption by atmospheric constituents. Note that the shape of curve (A) corresponds closely to the curve for a blackbody radiating at 5900°C, which suggests that the Sun's radiating surface is approximately this temperature.

Espectro Radiación Solar: Solar Radiation Spectrum



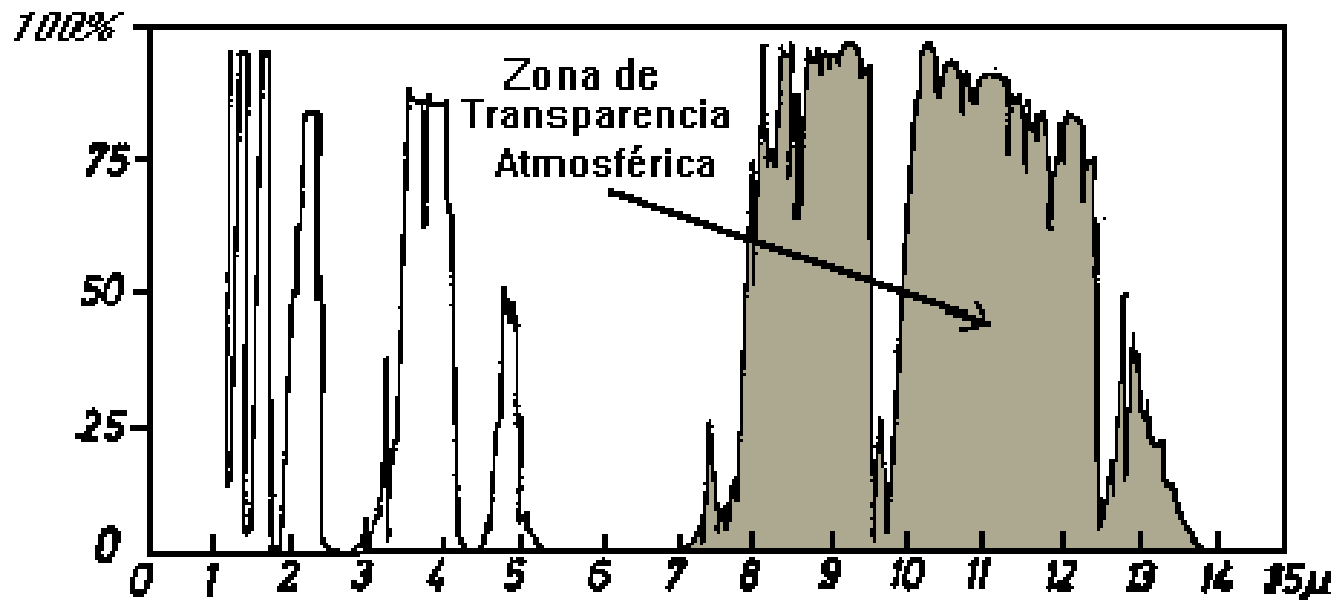
En la figura vemos el espectro de radiación solar fuera de la atmósfera y a nivel del mar. Se observa además el espectro de emisión de un cuerpo negro a 5250°C (5523K).

Naturaleza de Radiación:

La *potencia* emitida también crece rápidamente con la temperatura. A temperaturas en torno a los 100°C un cuerpo emite del orden de 1 [kW/m²].

Naturalmente la *tierra* también emite radiación hacia el espacio. Una parte significativa de esta radiación se pierde por medio de una *ventana de transparencia atmosférica* que existe entre los 8 y 14 [μm] de longitud de onda. El CO₂ y vapor de agua tienden a cerrar esta ventana, de allí el peligro del efecto invernadero y calentamiento global.

Naturaleza de Radiación:



Esta “ventana” de transparencia atmosférica explica rocío, escarcha y heladas. Es básica para balance térmico de tierra.

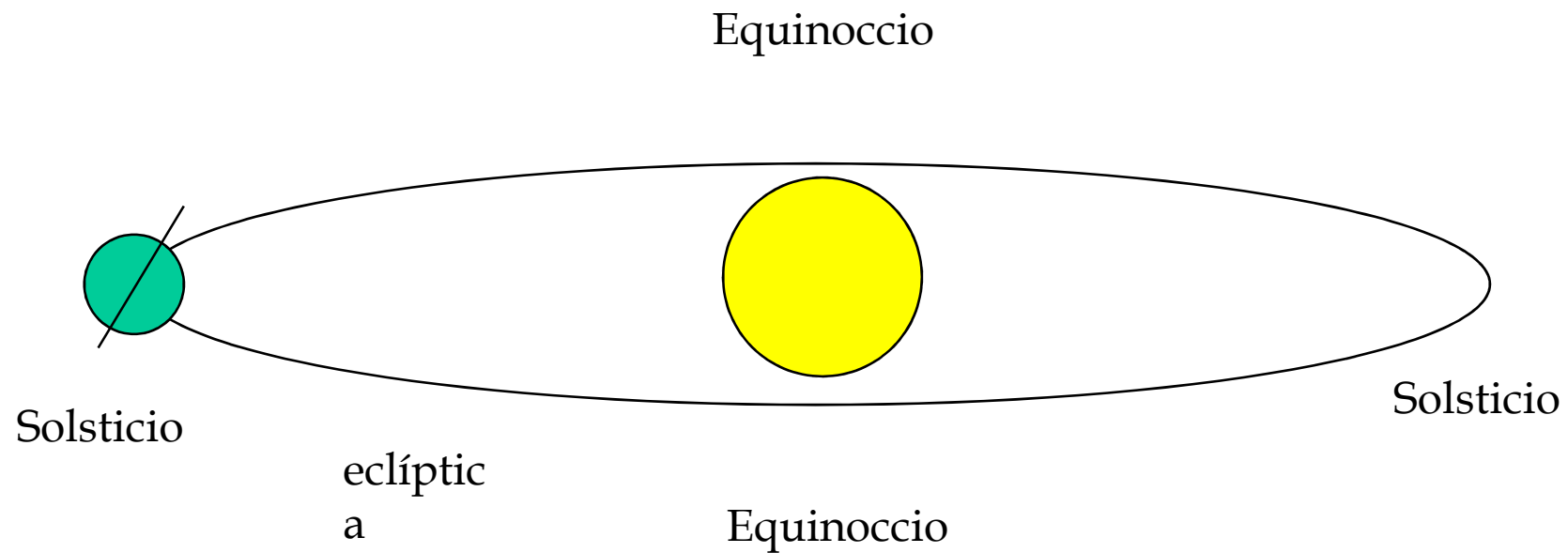
Introducción

Para comprender bien el funcionamiento y posibilidades de los sistemas solares es muy necesario saber sus posibilidades y limitaciones.

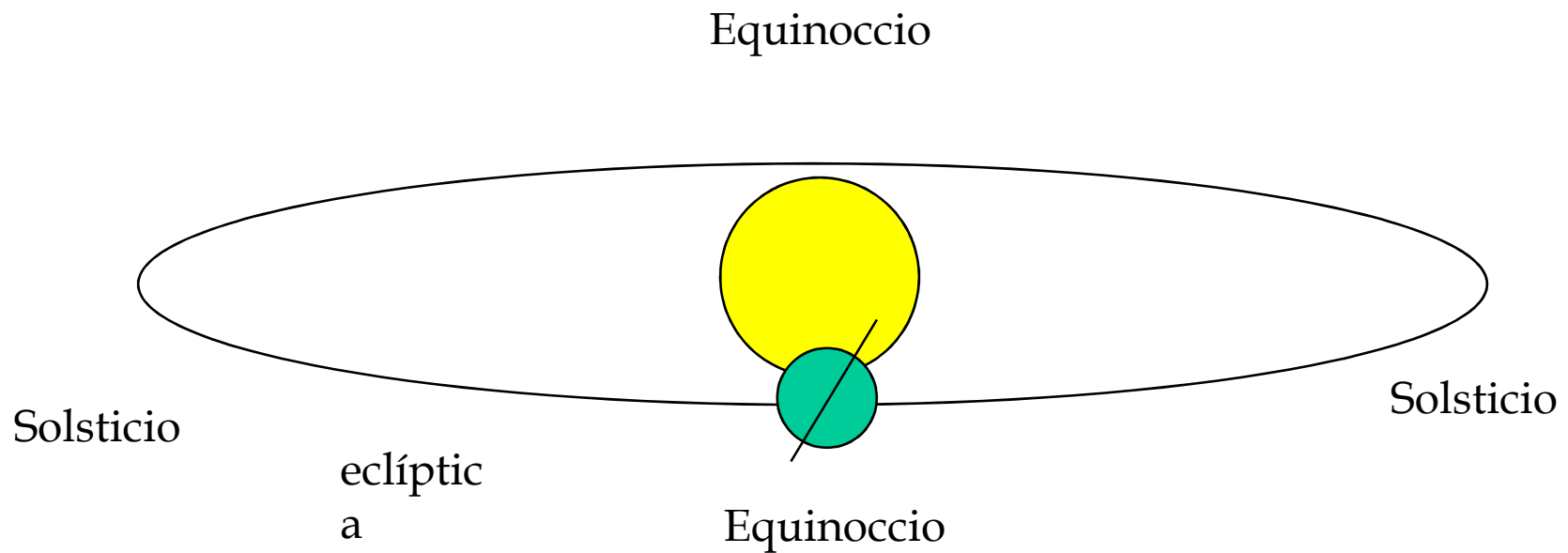
Una de las primeras cosas básicas es comprender las magnitudes involucradas y lo que realmente podemos realizar con la energía que llega del sol.

Esto evitará excesivo optimismo o desilusiones innecesarias.

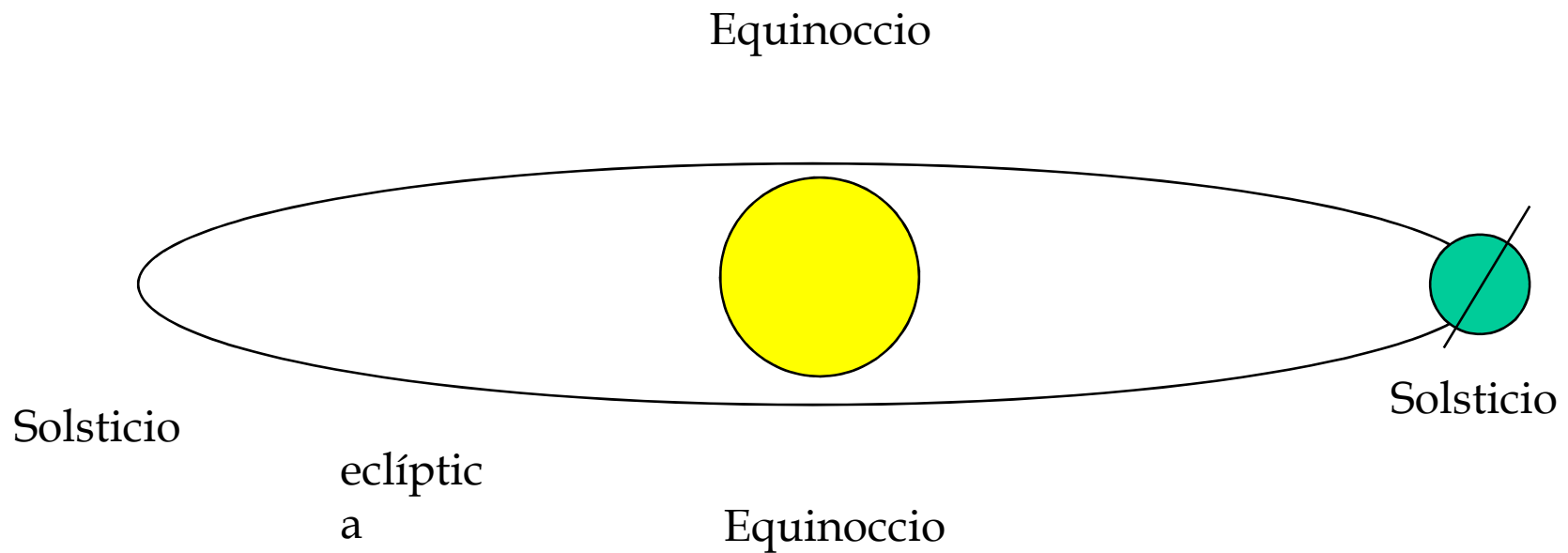
Trayectoria Tierra en torno al sol



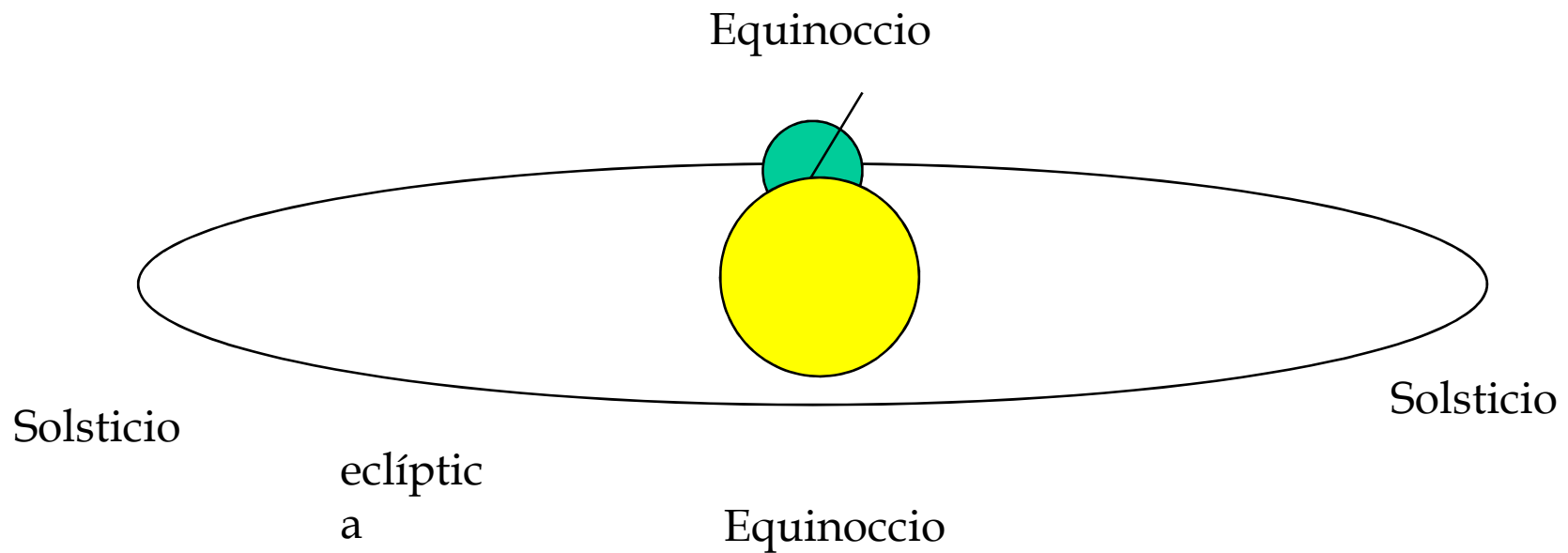
Trayectoria Tierra



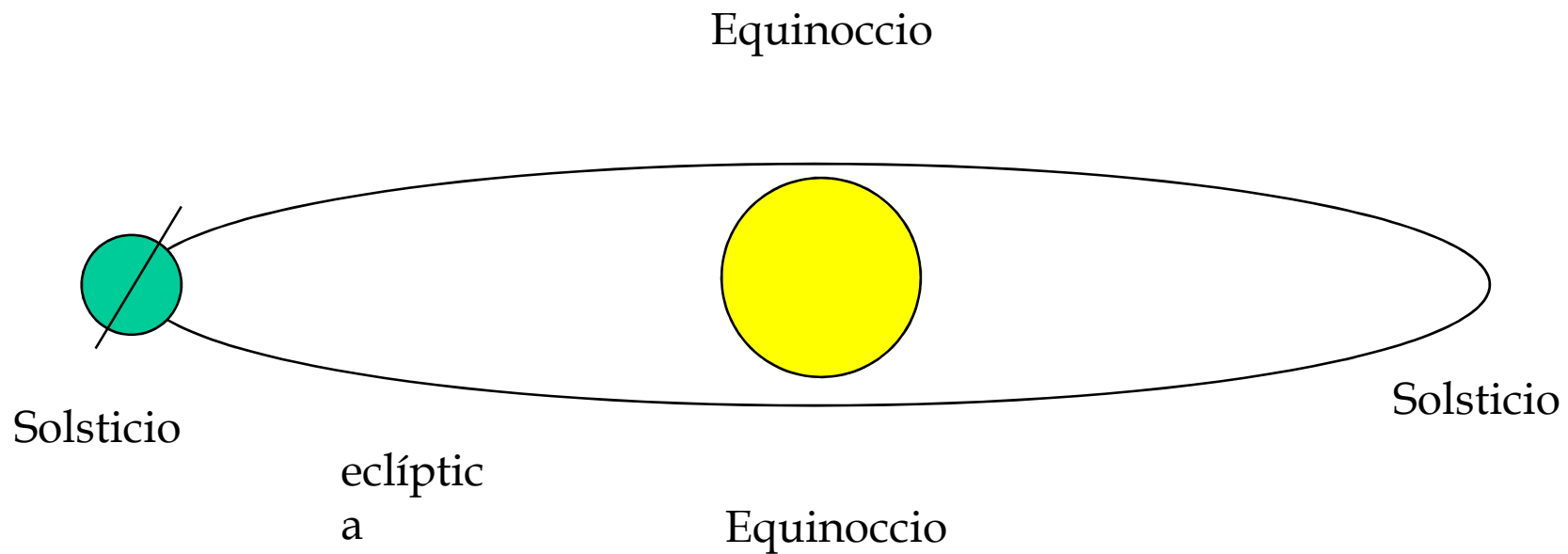
Trayectoria Tierra



Trayectoria Tierra



Trayectoria Tierra



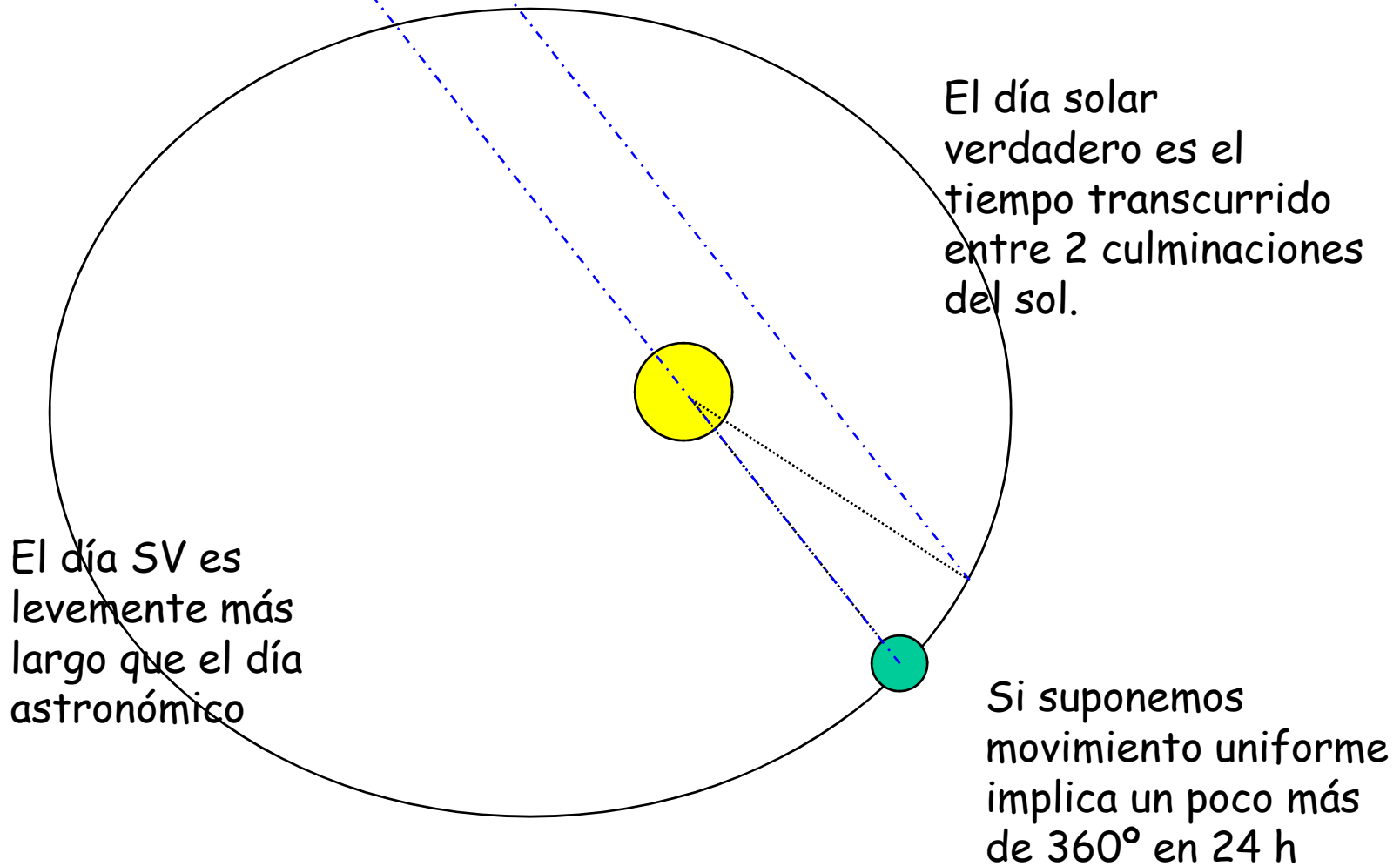
La órbita terrestre en torno al sol demora
365,24 días aproximadamente.

Tiempo y Hora

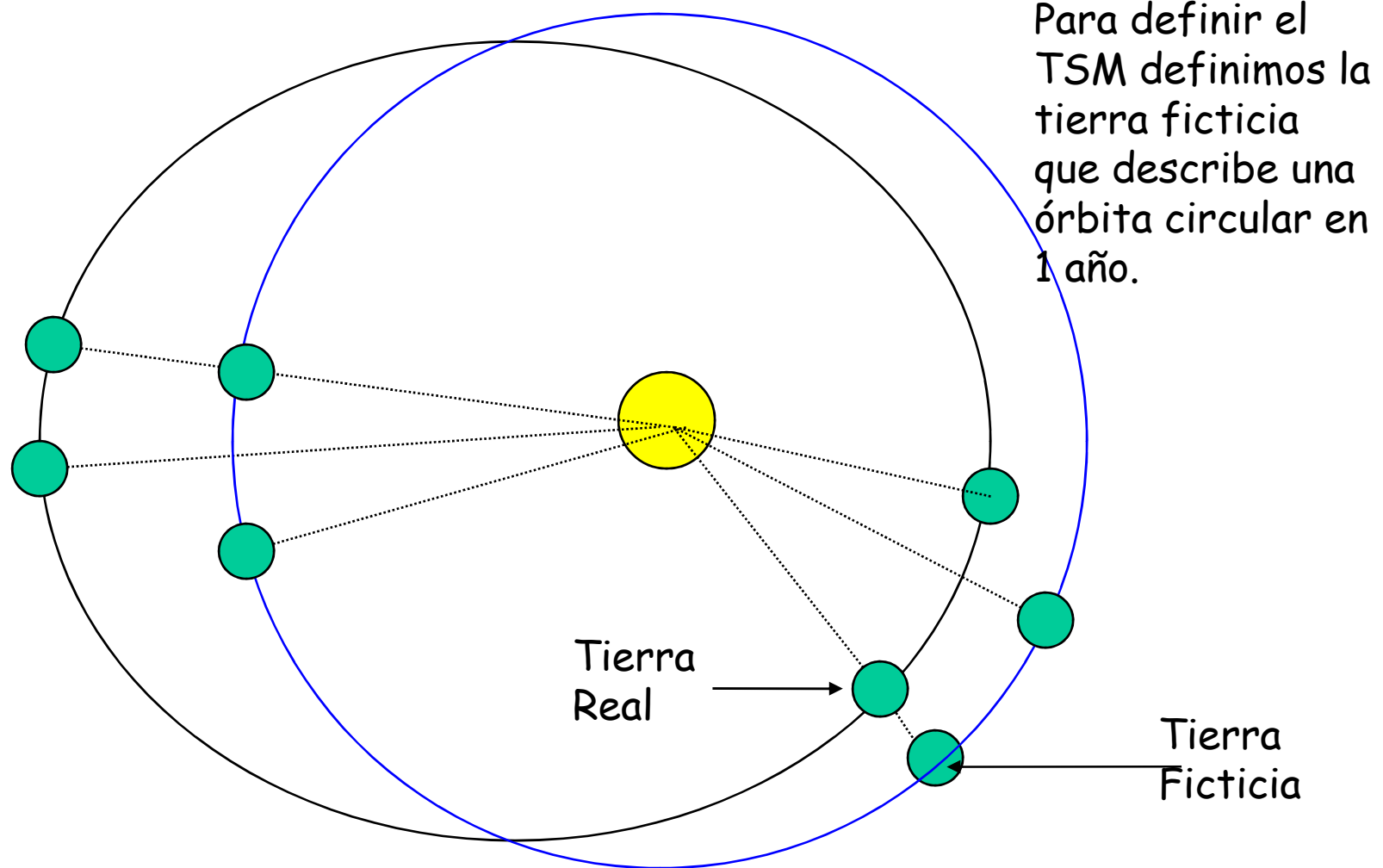
Podemos hablar de los siguientes tiempos:

- Tiempo Solar Verdadero: aquel que marcan los relojes de sol. Un día solar es el tiempo que transcurre entre 2 culminaciones sucesivas del sol sobre el meridiano del lugar.
- Día Astronómico: es análogo al anterior, salvo que es el tiempo transcurrido entre 2 culminaciones del punto vernal.
- Año Solar: es el tiempo solar real en describir una órbita completa en torno al sol.
- Tiempo Solar medio: es el tiempo medido para una tierra ficticia que circula en una órbita perfectamente circular.
- Ecuación del tiempo: diferencia de tiempo entre tiempo solar verdadero y tiempo solar medio.

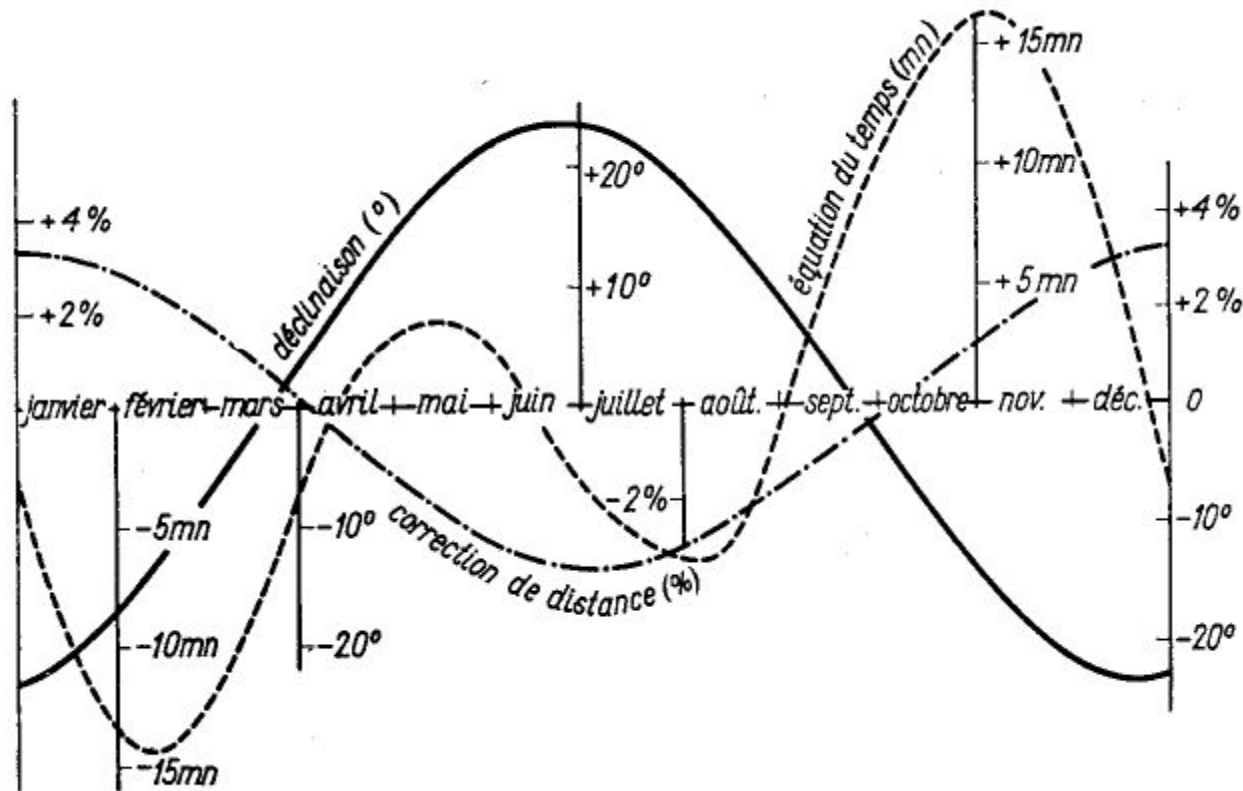
Definición TSV



Definición TSM



La diferencia entre TSV y TSM es la Ecuación del Tiempo



Courbes annuelles moyennes

Relación entre Tiempos

- $TSM = TSV + Ec. \text{ Tiempo}$
- $TU = \text{Tiempo Universal} = TSM \text{ de Meridiano Greenwich}$
- $HL = \text{Hora Legal} = TU \pm \Delta N \text{ según longitud}$
- En el caso de Santiago, estamos a 70° Longitud Oeste. Implica un Δ de 4,7 horas. Realmente tenemos una diferencia de 4 horas en invierno y 3 horas en verano.

Cosas importantes a retener

La distancia tierra – sol media es de unos 150 millones de kilómetros.

La tierra describe una órbita completa en torno al sol en un **año solar**, lo que equivale a 365,24 días.

La órbita de la tierra en torno al sol es levemente elíptica. Esto hace que estemos más cerca del sol en diciembre y más lejos en julio.

Los relojes de sol dan el **TSV**: tiempo solar verdadero.

La hora se fija de acuerdo al **TSM**: tiempo solar medio.

La diferencia entre el **TSV** y el **TSM** se llama *ecuación del tiempo*.

En el caso de Santiago, tenemos una diferencia de 4 horas en invierno y 3 horas en verano con el **TU**. Aquí es **más temprano**.

Radiación solar a nivel de la tierra

Calculemos rápidamente la energía total que emite el sol:

La constante solar es de 1353 [W/m²] y la distancia tierra – sol es de 150 millones de kilómetros. Con ello podemos calcular la energía solar total que atraviesa una esfera de 150 millones de kilómetros de radio.

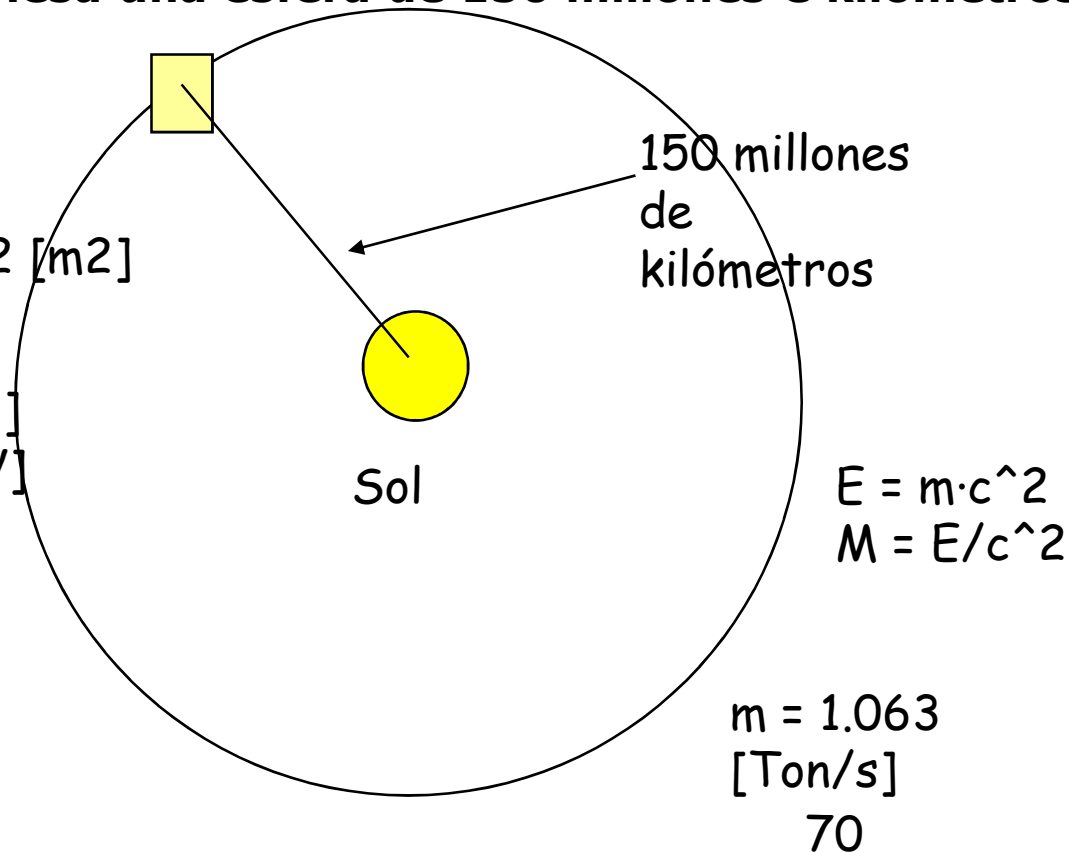
$$E = 1.353 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$S = \pi \cdot d^2$$

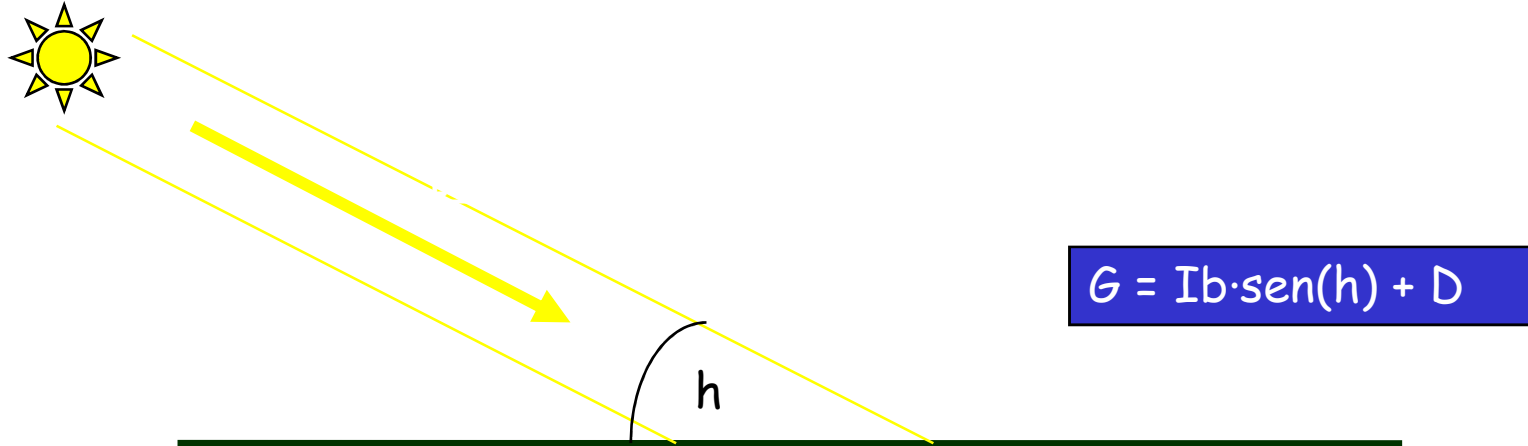
$$S = \pi \cdot (150 \times 10^9)^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S = 7,06 \times 10^{22} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$E = 9,56 \times 10^{22} \text{ [kW]}$$



Radiación solar a nivel de la Tierra



En una superficie de 1 m² a la distancia media tierra – sol y perpendicular a los rayos del sol, la intensidad es de 1.353 [W/m²].

Al atravesar la atmósfera la radiación se atenúa, difunde y dispersa.

Se llama **radiación directa** a aquella que proyecta sombra.

La **radiación difusa** es la que viene de las otras direcciones de la bóveda celeste.

Al atravesar la atmósfera, la intensidad de esta radiación se atenúa por efecto de la atmósfera. Así es que a nivel del suelo, la intensidad de la radiación **directa** es del orden de los 800 a 1.000 [W/m²].

La **radiación global** es la suma de la intensidad de la directa más la difusa.

Modelo de Perrin de Brichambaut

Se puede estimar bastante bien la intensidad de radiación solar para cuando el disco solar no está interceptado por nubes. Es lo que se llaman: "modelos de día claro". Uno sencillo de aplicar es el de *Perrin de Brichambaut*, investigador francés de energía solar:

$$I = A \cdot \exp[-1/(B \cdot \sin(h+C))] \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Con los valores de A, B y C datos empíricos conforme a la siguiente Tabla:

	C. Claro	C. Normal	C. Contam.
A	1210	1230	1260
B	6	3,8	2,3
C	1	1,6	3
K	0,75	1	1,33

En esta relación, la altura solar, h está expresada en grados

Modelo de Perrin de Brichambaut

El mismo investigador propone un modelo sencillo para la radiación difusa:

$$D = 125 \cdot K \cdot [\sin(h)]^{0,4} \quad [\text{W/m}^2]$$

Conociendo la radiación directa y difusa, es muy sencillo calcular la radiación global sobre plano horizontal:

$$G = I \cdot \sin(h) + D$$

Con lo cual podemos estimar radiación en días despejados. Veamos que ocurre en un plano inclinado orientado hacia el Ecuador:

En esta relación, la altura solar, también h se expresa en grados

Desplazamiento del sol

Recordemos las ecuaciones básicas que describen el movimiento aparente del sol.

Primero la que describe la altura solar:

$$\text{sen}(h) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH)$$

A continuación la que describe el Azimut solar:

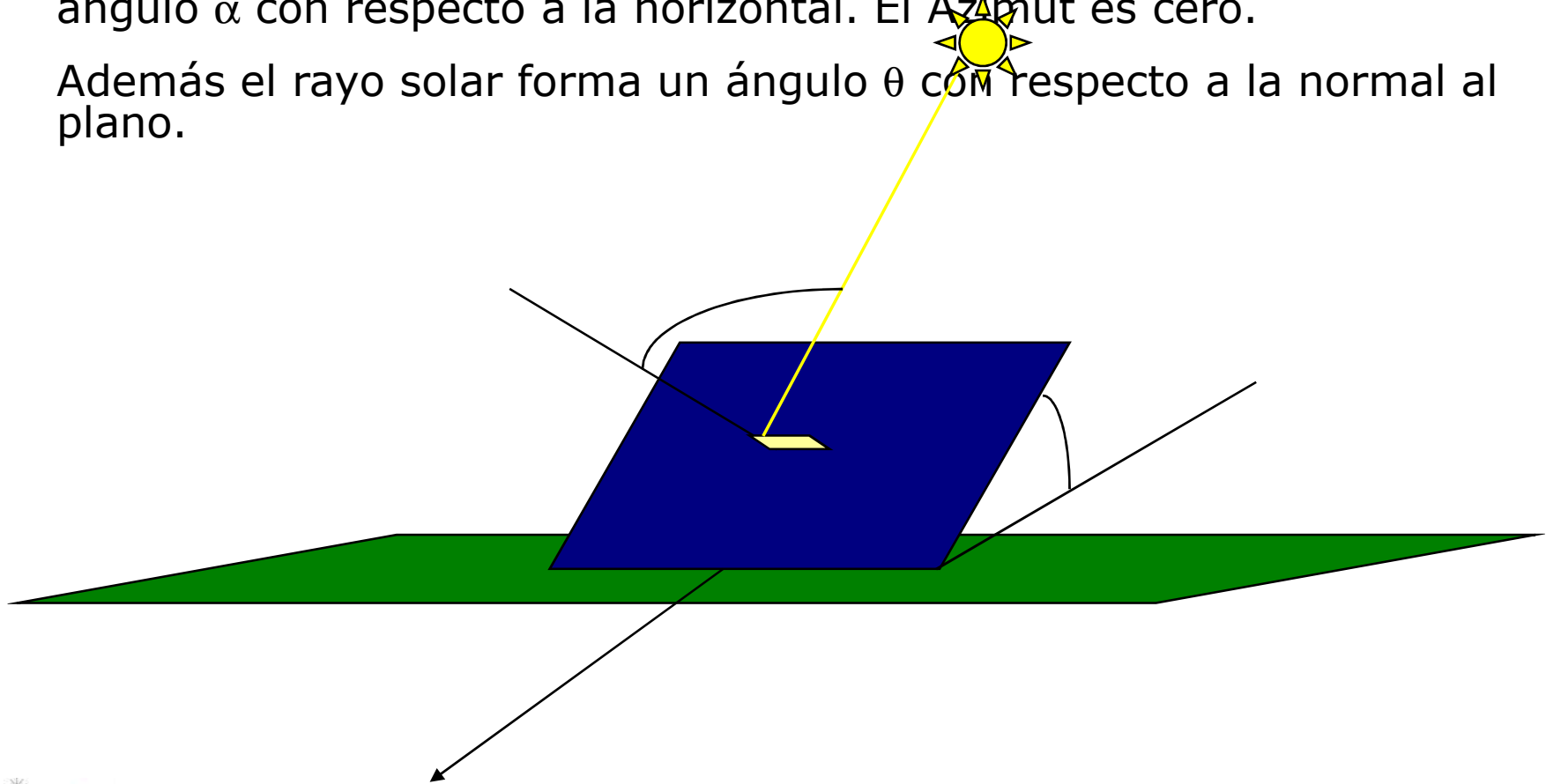
$$\cos(Az) = \text{SIGNO}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(AH) - \text{sen}(h) \cdot \cos(\phi)}{\cos(h) \cdot \text{sen}(\phi)}$$

Para un plano que mira al Ecuador se da la siguiente situación:

Plano inclinado hacia el Ecuador

En este caso la situación es algo más compleja: el plano forma un ángulo α con respecto a la horizontal. El Azimut es cero.

Además el rayo solar forma un ángulo θ con respecto a la normal al plano.



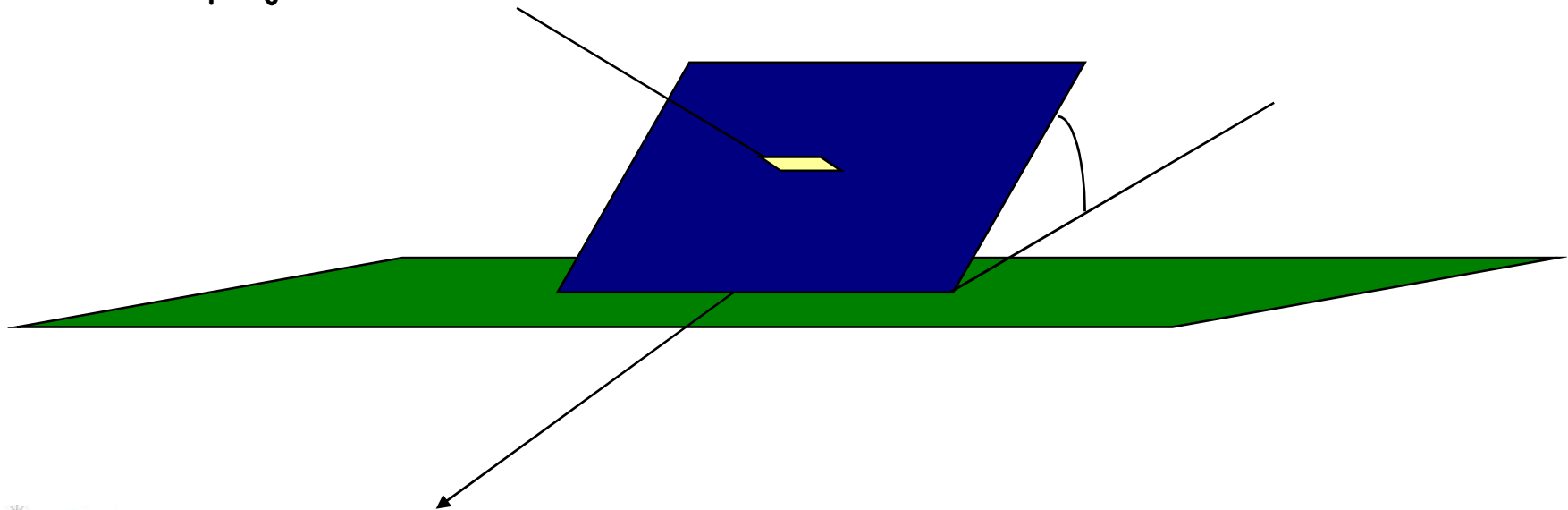
Plano inclinado hacia el Ecuador

Se cumple que:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\phi \pm \alpha) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi \pm \alpha) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH)$$

Al aplicar la ecuación, hay que tener cuidado de discriminar cuando el sol está por detrás del plano captor.

En el caso de un plano con Azimut distinto de cero, la ecuación es más compleja.



Radiación Extraterrestre

Es sencillo calcular la **máxima** cantidad de radiación solar que puede llegar a un plano horizontal, esta está dada por:

$$H_0 = \frac{T}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365,24}\right) \right] \cdot (\cos \delta \cdot \cos \phi) (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)$$

En esta ecuación los ángulos están expresados en radianes, T es la duración del día (86.400 segundos) y ω_s el ángulo horario de salida y puesta de sol (en radianes).

Para un lugar dado podemos definir el *índice de transparencia atmosférica* como:

$$K_T = \frac{H_H}{H_0}$$

Duración Día y Ecc. Angström

Podemos establecer fácilmente la duración teórica del día como:

$$S_0 = \frac{2 \cdot \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]}{15}$$

- Si llamamos S la cantidad de horas de sol reales en un lugar, entonces la *fracción de asoleamiento* será:

$$\overline{K}_s = \frac{\overline{S}}{\overline{S}_0}$$

- Angstrom demostró que para valores medios mensuales existe una buena correlación lineal entre la fracción de horas de sol y la radiación solar sobre plano horizontal. Esta viene dada por:

$$\overline{K}_T = a + b \cdot \overline{K}_s$$

o

$$\overline{H}_H = \overline{H}_0 (a + b \cdot \overline{K}_s)$$

Duración Día y Ecc. Angström

Por lo tanto si conocemos la fracción de horas de sol en un lugar, será relativamente sencillo estimar la radiación solar sobre plano horizontal.

Trabajos posteriores a Angstrom establecieron que:

$$a + b \approx 0,75$$

- En la siguiente Tabla se presentan algunos valores típicos de a y b para lugares típicos de Chile. Además se indica de donde se obtuvieron las referencias.

Lugar Observación	Aplicable en Chile	a	b
Albuquerque NM (USA)	Pampa desértica	0,41	0,37
La Serena (Chile)	Costa Central y Norte	0,30	0,38
Ayacucho (Perú)	Altiplano	0,41	0,40

Instrumentos para Medir Radiación Solar

Los instrumentos para medir datos solares se clasifican en:

Pirheliómetros: miden la radiación **directa**, es decir que viene directamente del disco solar. Típicamente son los *patrones*.

Piranómetros: miden la radiación **global** es decir la directa y la difusa. Operan según varios principios.

Heliógrafos: sirven para registrar las **horas** de sol en un lugar.

A la vez se clasifican según la **precisión** y estabilidad de los mismos en:

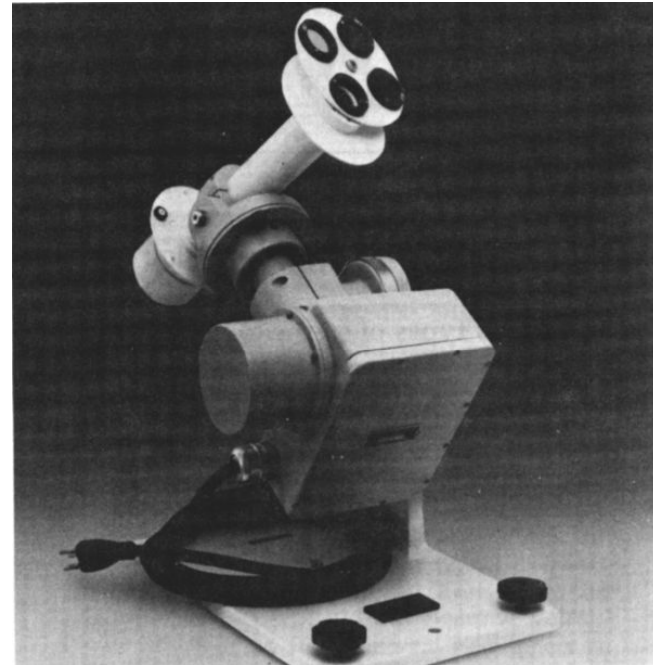
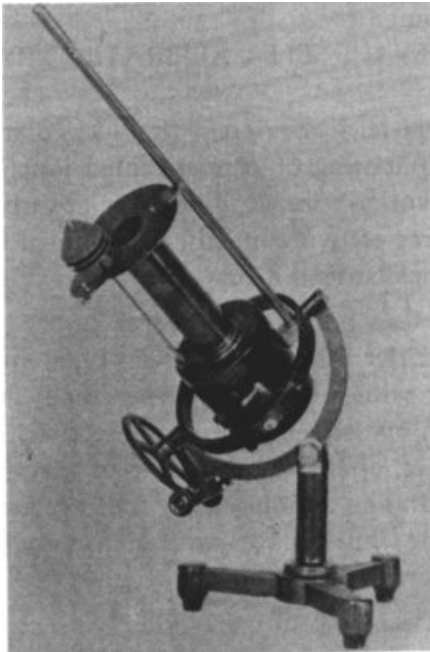
Patrones: error inferior al 0,5%, estabilidad mejor que 1% anual.

Primera Clase: error inferior al 1%, estabilidad mejor que 1 a 2% anual.

Segunda Clase: error inferior al 2%, estabilidad mejor que 2% anual.

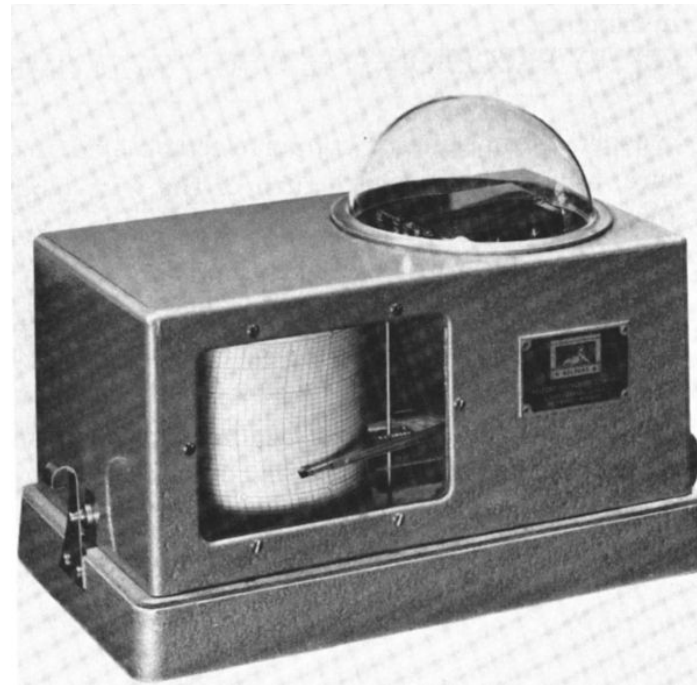
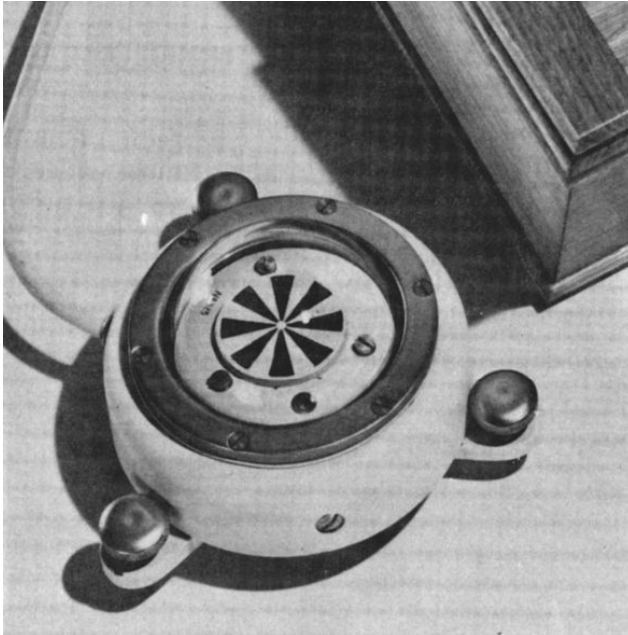
Veamos rápidamente algunos ejemplos:

Instrumentos para Medir Radiación Solar



Pirheliómetros: de Abbot (disco de plata) y Angstrom

Instrumentos para Medir Radiación Solar



Piranómetros: Eppley (termocupla) y Robitsch (bimetálico)

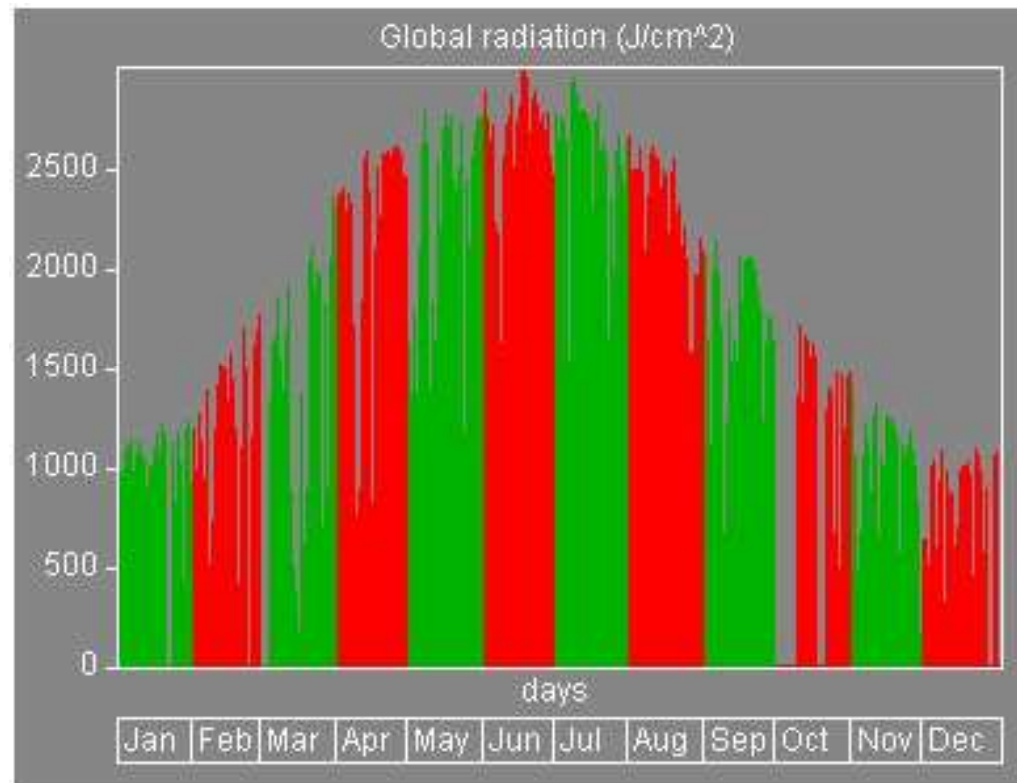
Recurso Solar:

- ▶ **Energía solar:** fuera de la atmósfera, la intensidad de la radiación solar es de $1353 \text{ [W/m}^2\text{]}$ en un plano perpendicular a los rayos del sol.
- ▶ A nivel de la tierra, la intensidad depende de varios factores:
 - En primer lugar los *Astronómicos*. Es decir la *Latitud*, *el día del año* y *la hora*.
 - En segundo lugar del estado del cielo, en particular la nubosidad (tipo, espesor, ubicación).
 - En tercer lugar de otros fenómenos tales como *altura*, *turbiedad* de la atmósfera, *columna de agua precipitable* y otros factores menores.
- ▶ Para días despejados, es muy predecible la intensidad de la radiación directa, difusa y global.
- ▶ A nivel terrestre, la mayor cantidad de energía cae en la banda de $\pm 30^\circ$ de Latitud.

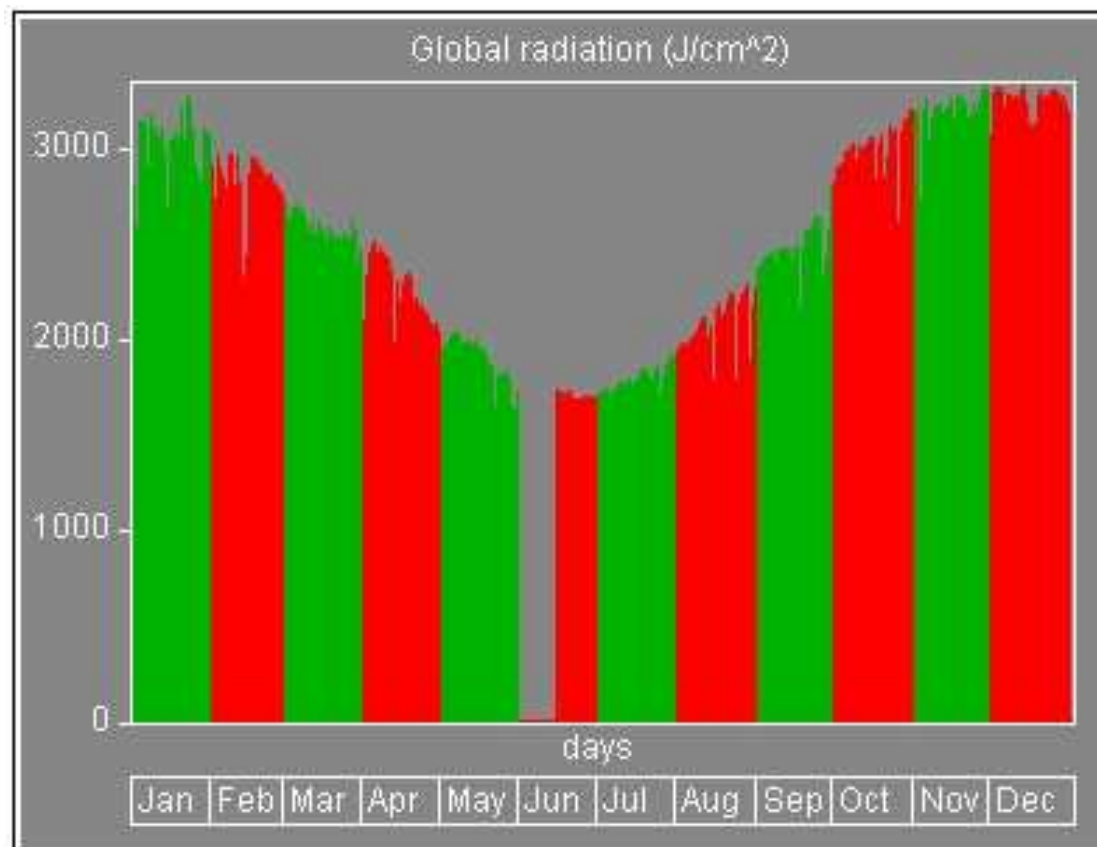
Recurso Solar *en bruto*:

- ▶ Hoy día existe abundante información sobre radiación solar en plano horizontal. Por lo menos los valores medios mensuales. Las fuentes que existen son:
 - Datos de estaciones terrestres. Se sistematizan en el World Radiation Data Center que depende de la WMO (World Meteorological Organization).
 - Datos de mediciones satelitales, las que se corrigen a nivel del suelo con algoritmos. Disponibles en *NASA*.
 - Diversos programas que traen bases de datos. Por ejemplo *RetScreen*, *SAM*, *TRNSYS*, *Meteonorm*, etc.
- ▶ Siempre uno debe preguntarse sobre la calidad de los datos.
- ▶ En efecto, para sistemas térmicos, un error de datos de un 10% puede inducir a un error de dimensionamiento de 20% o más.
- ▶ A continuación veamos los datos “en bruto” de seis ciudades obtenidos de *Retscreen*.

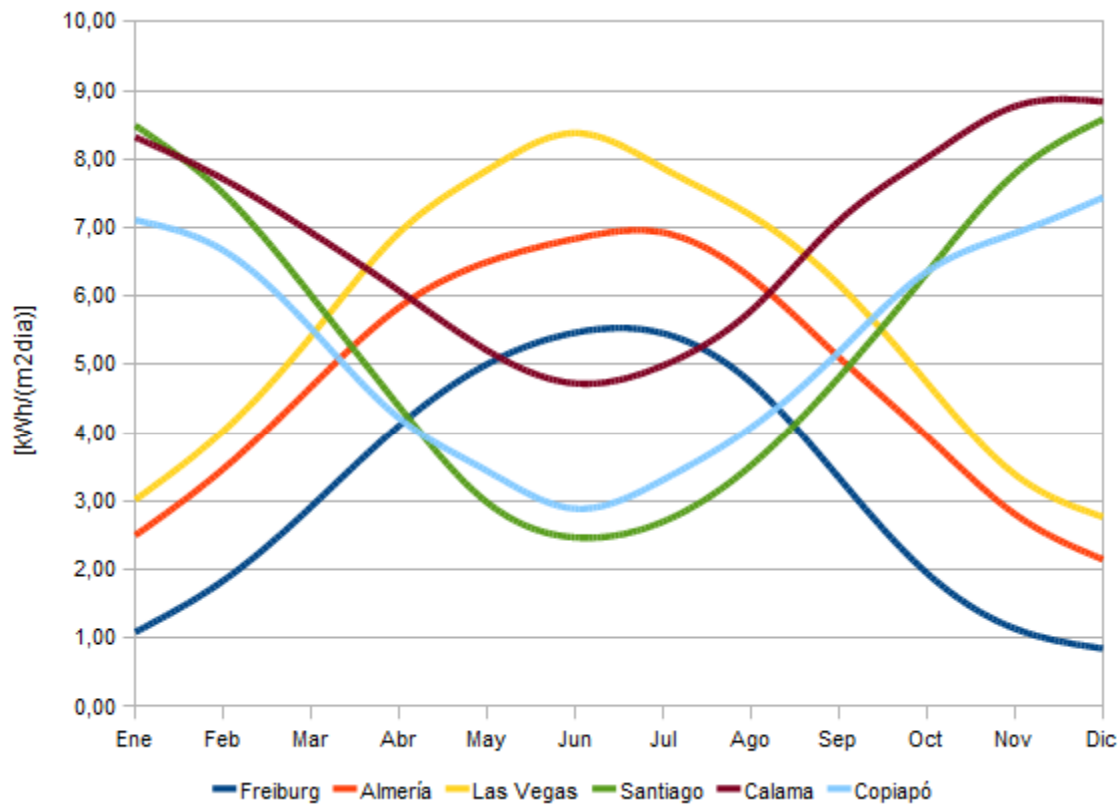
Recurso Solar *en bruto*:



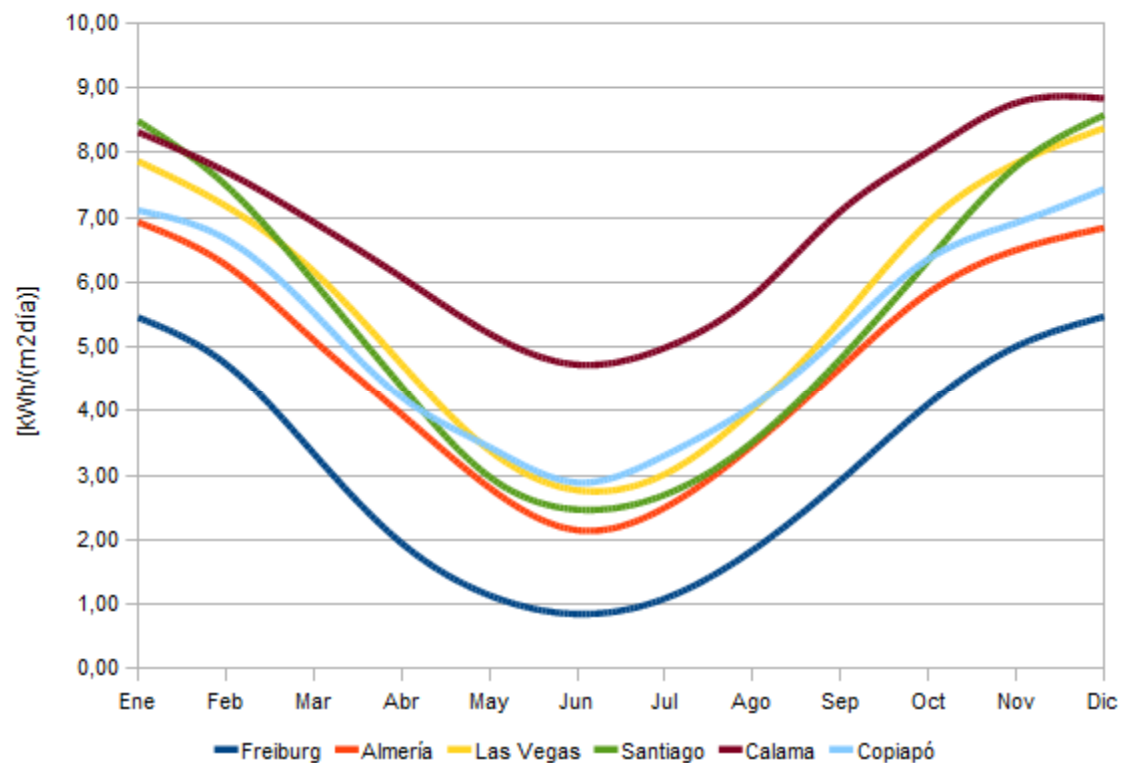
Recurso Solar *en bruto*:



Recurso Solar *en bruto*:



Recurso Solar corregido:



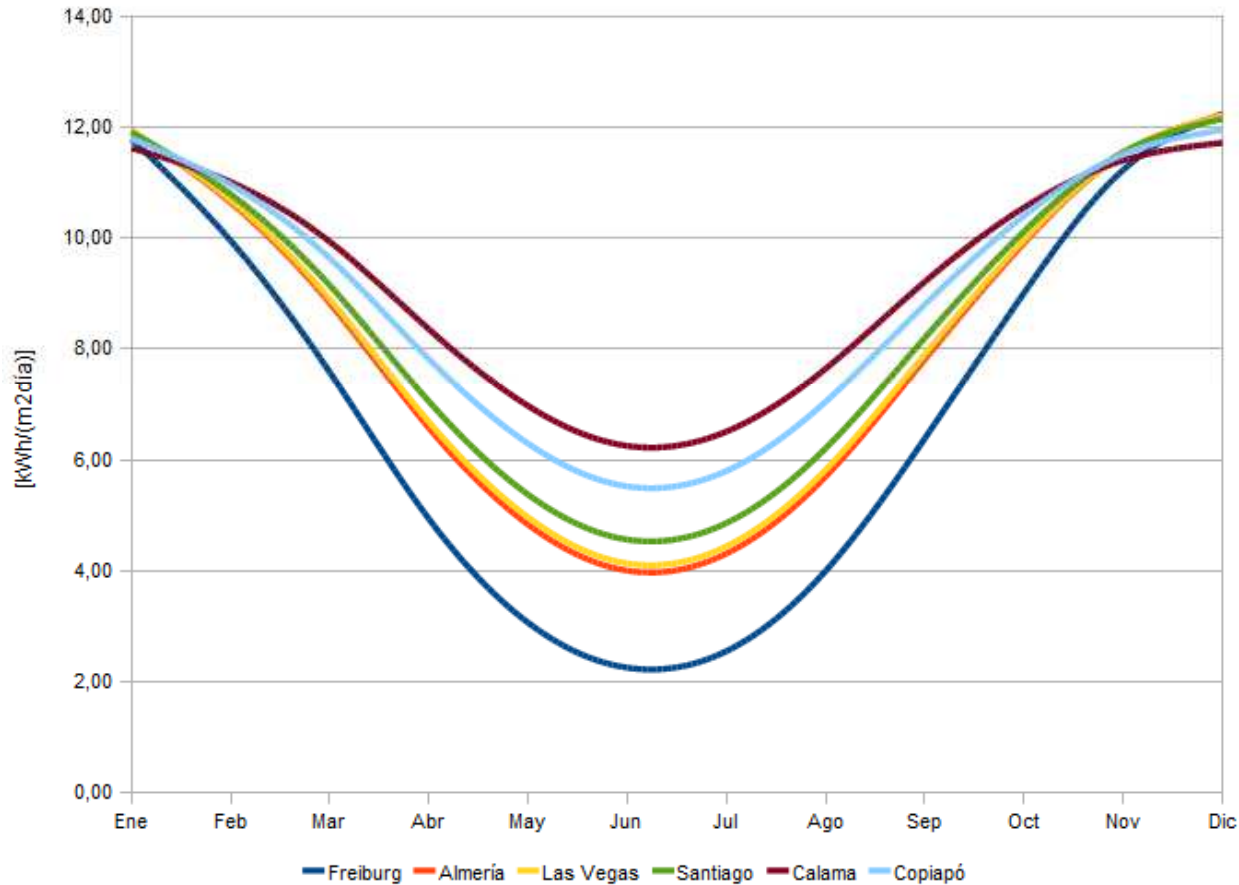
Recurso Solar comparativo:

- ▶ **Radiación Solar en ausencia de atmósfera:** se denomina H_0 y se puede calcular como:

$$H_0 = \frac{T}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365,24} \right) \right] (\cos \delta \cos \phi) (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)$$

- ▶ I_0 es la constante solar, el factor entre corchetes da cuenta de la excentricidad de la órbita terrestre y los otros dos factores dan cuenta de la latitud y declinación del sol.
- ▶ A continuación vemos como varía la radiación extraterrestre a lo largo del año para cinco localidades: Freiburg; Almería; Las Vegas; Santiago; Copiapó y Calama. Para facilitar la comprensión, hemos puesto “en fase” las estaciones en los lugares del Hemisferio Norte con el Sur.

Valores de H_o promedio para diversas localidades...



H_o y K_T :

- ▶ Es claro que los valores máximos varían poco según la latitud (salvo para casos muy extremos).
- ▶ También es claro que sí influye mucho la latitud para las épocas de menos radiación solar.
- ▶ Existe un factor clave que permite determinar la claridad media del cielo. Este valor se llama *Índice de Transparencia atmosférica*, K_T .
- ▶ Si llamamos H_h la radiación solar media (diaria o mensual) a nivel del suelo y H_o la extraterrestre para el mismo período, entonces:

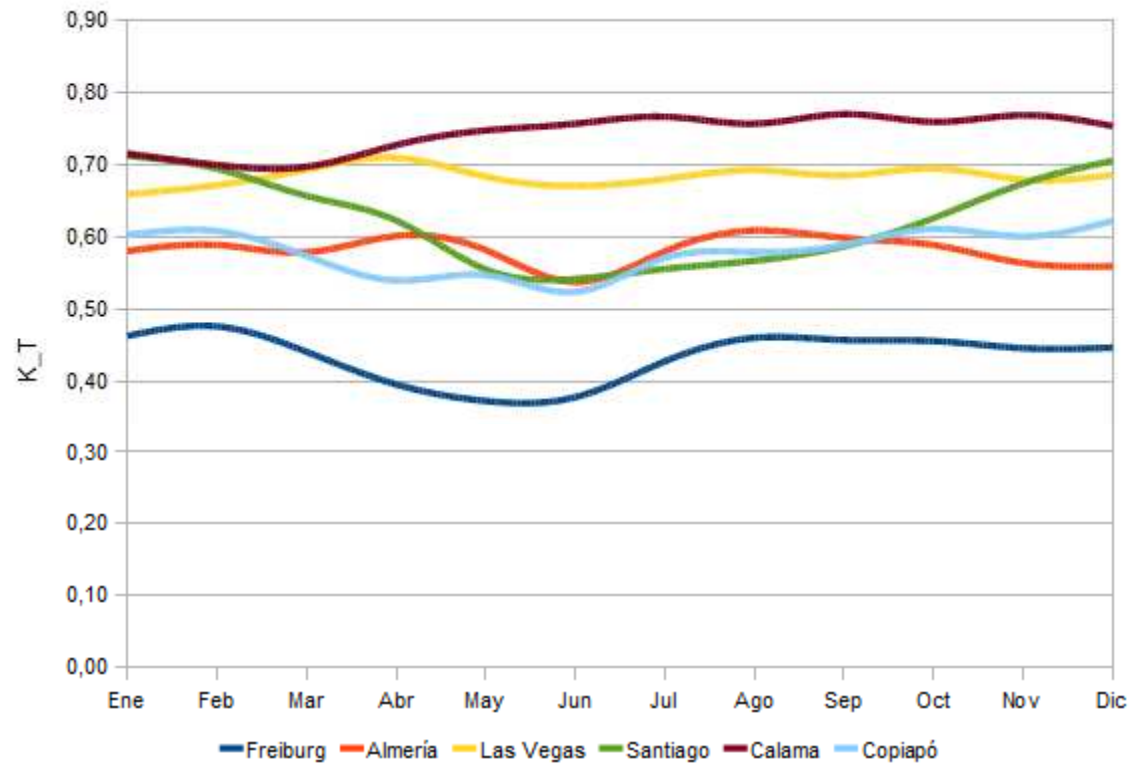
$$K_T = H_h/H_o$$

- ▶ Mientras más alto sea este valor, implica cielo más transparente y menos nubosidad.

Transparencia Atmosférica:

- ▶ Los lugares nubosos tienen transparencias promedio mensual del orden de 0,40.
- ▶ Lugares *muy* nubosos y lluviosos pueden tener valores en torno a 0,30.
- ▶ Valores más pequeños se observan solo en invierno en latitudes muy elevadas.
- ▶ Cuando K_T es mayor que 0,60, implica cielos muy claros.
- ▶ Valores de K_T mayores a 0,70 implica que casi no hay nubes.
- ▶ Comparemos los valores de K_T para las localidades que estamos analizando:

Transparencias comparadas de seis lugares...



Componentes de radiación solar:

- ▶ Cualquier proyecto solar necesita tener datos o estimar de manera precisa cuanta de la energía que llega es:
 - ▶ **Radiación directa:** es decir la que llega directamente del sol.
 - ▶ **Radiación difusa:** la de las otras direcciones de la bóveda celeste.
 - ▶ Y una estimación del **albedo** para así determinar la cantidad de reflexiones secundarias.
- ▶ Hacerlo de manera precisa requiere mediciones y tiempo. Y los datos se necesitan para buenas modelaciones y diseños.
- ▶ Por suerte hay modelos diversos, los que son particularmente buenos para lugares con cielos muy puros y transparentes. Estos nos pueden ayudar al menos en las etapas iniciales de un proyecto.

Conclusiones del punto:

- ▶ Existen numerosos datos de radiación solar disponible para diversas partes del mundo, e incluso Chile:
 - ▶ En general se trata de valores promedio mensual. Pero también existen valores diarios e incluso horas de sol.
 - ▶ En el caso de Chile casi no hay datos de radiación directa y difusa.
 - ▶ Es necesario validar la calidad de la información. Pero hay buenas herramientas para hacerlo.
- ▶ Para las zonas del país donde existe el mayor potencial de uso de la Concentración Solar, las condiciones de transparencia son excepcionales. Esto permite:
 - ▶ Usar buenos modelos para calcular las componentes directa y difusa a lo largo del día. Al menos en las primeras fases.
 - ▶ Verificar, con pocas mediciones, la validez de lo modelado.

Energía Solar en Chile:

- ▶ La razón de la ubicuidad de los combustibles fósiles es simple:
 - ▶ Alta densidad energética. Un litro de diesel contiene una energía bruta de unos 10 kWh.
 - ▶ La típica radiación media incidente es de 4 a 8 [kWh/(m²día)]. Considerando las tecnologías de conversión, para generar la misma cantidad de energía se necesita unos 2 a 4 m² de superficie de captación (y la tecnología).
- ▶ Así que el recurso solar es *difuso*, y tampoco es continuo. En los lugares de Europa es bastante inferior a la mayor parte de Chile.
- ▶ Pero si uno tiene la tecnología para “cosechar” adecuadamente el sol, los números obtenibles son impresionantes.

Energía Solar en Chile:

Algunos números:

- En el norte de Chile, 1 m² de colector térmico puede generar al año el equivalente a 100 kg de combustible (a temperaturas bajas o medias). Esto es prácticamente el *doble* a lo obtenible en la mayor parte de Europa.
- Para generar 2750 MWe a firme (factor de planta 0,85) se necesitan entre 4800 y 8250 Ha (según la tecnología que se utilice).
- A modo de comparación Hidroaysén propone generar 2750 MW inundando 5910 Ha.
- Pero sin duda es una tecnología que está en plena evolución.

Energía Solar en Chile:

Algunos números:

- En el norte de Chile, 1 m² de colector térmico puede generar al año el equivalente a 100 kg de combustible (a temperaturas bajas o medias). Esto es prácticamente el *doble* a lo obtenible en la mayor parte de Europa.
- Para generar 2750 MWe a firme (factor de planta 0,85) se necesitan entre 4800 y 8250 Ha (según la tecnología que se utilice).
- A modo de comparación Hidroaysén propone generar 2750 MW inundando 5910 Ha.
- Pero sin duda es una tecnología que está en plena evolución.

Despejando algunos mitos...

- Freiburg, en el sur de Alemania, es conocida como "la ciudad del sol".
- Es el lugar de Alemania con la mayor cantidad de aplicaciones de energía solar.
- Allí se ubica el Instituto Solar Fraunhofer, líder mundial en investigación solar...

Vistas de Freiburg...



Vistas de Freiburg...

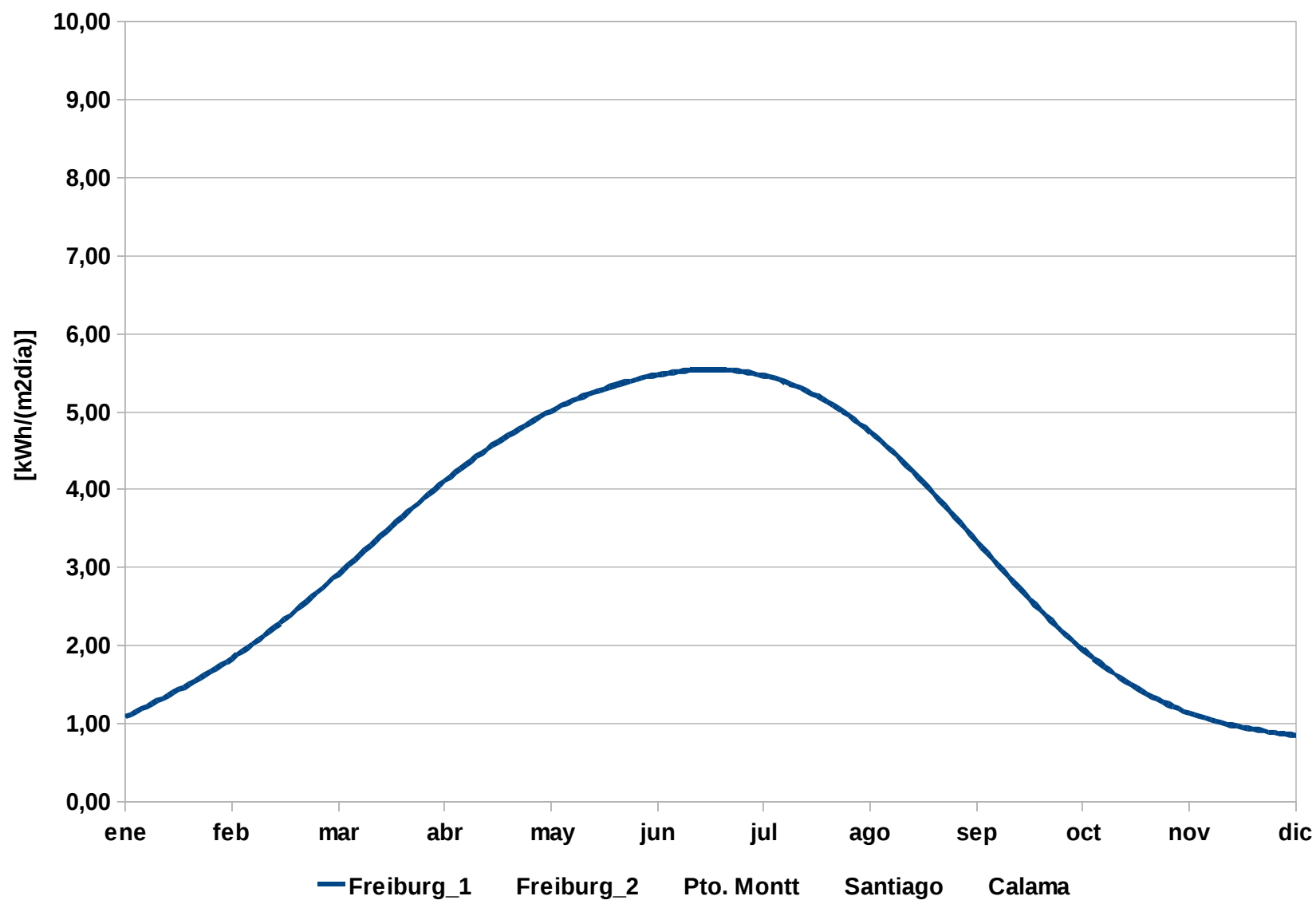


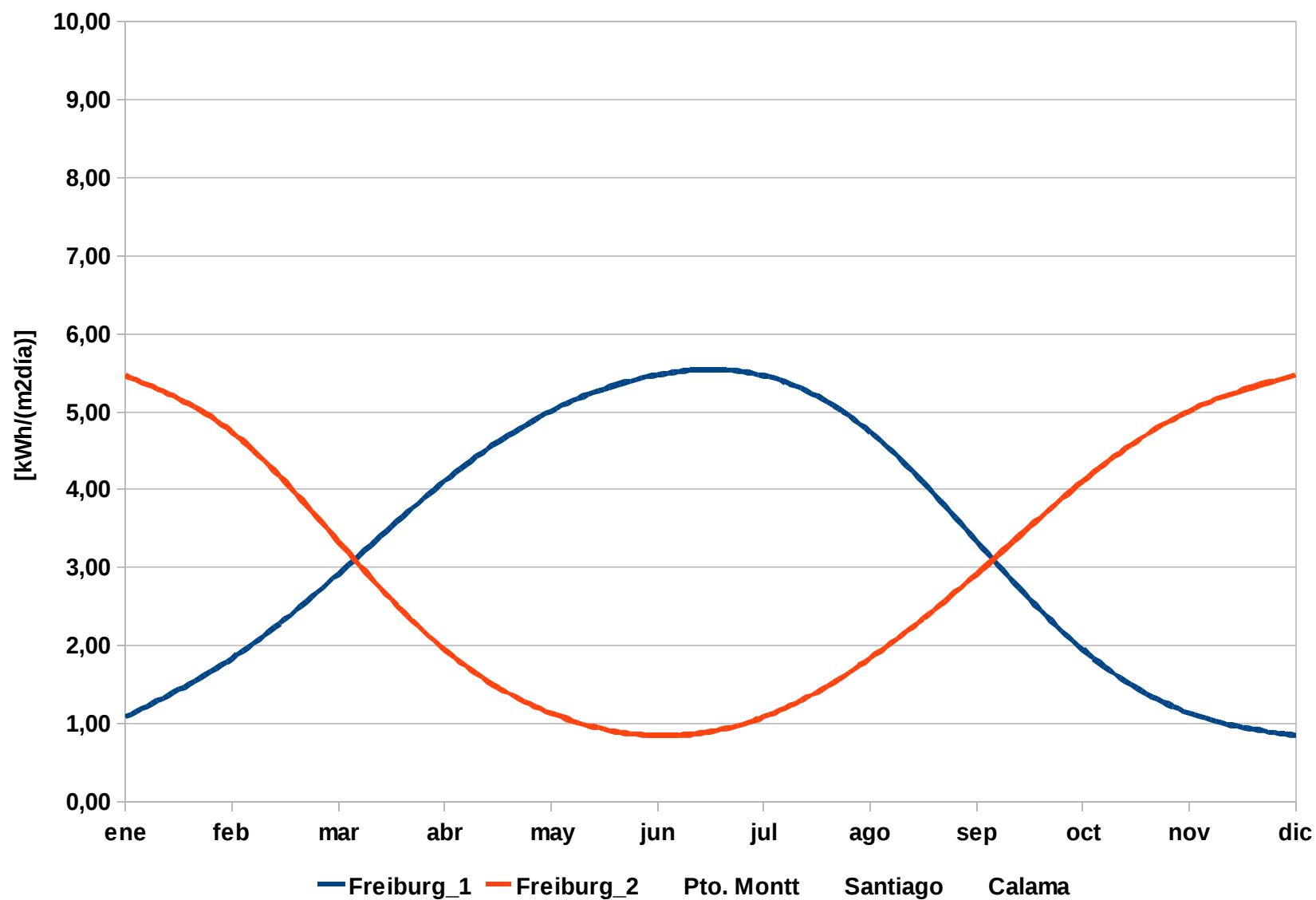
Vistas de Freiburg...

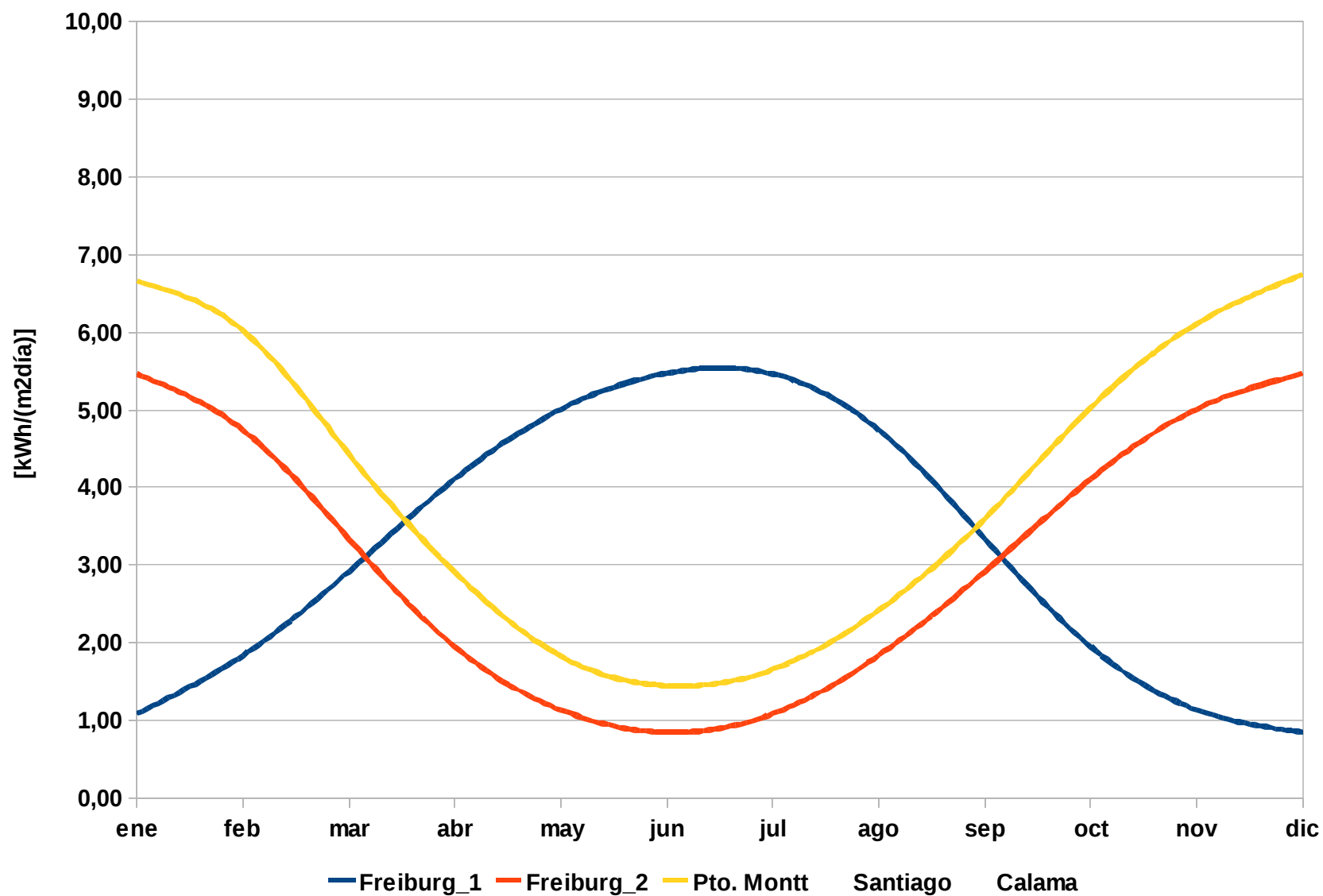


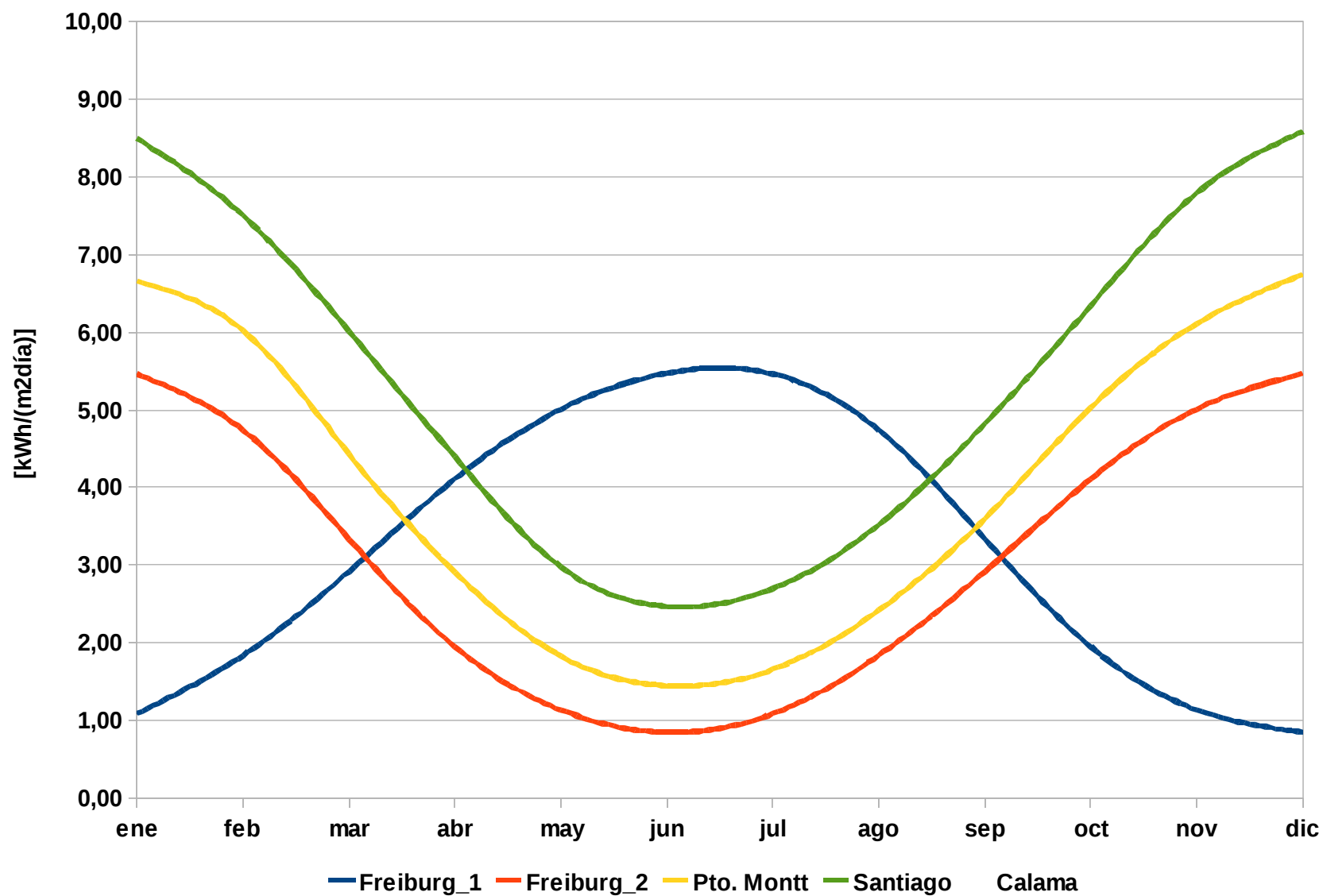
Vistas de Freiburg...

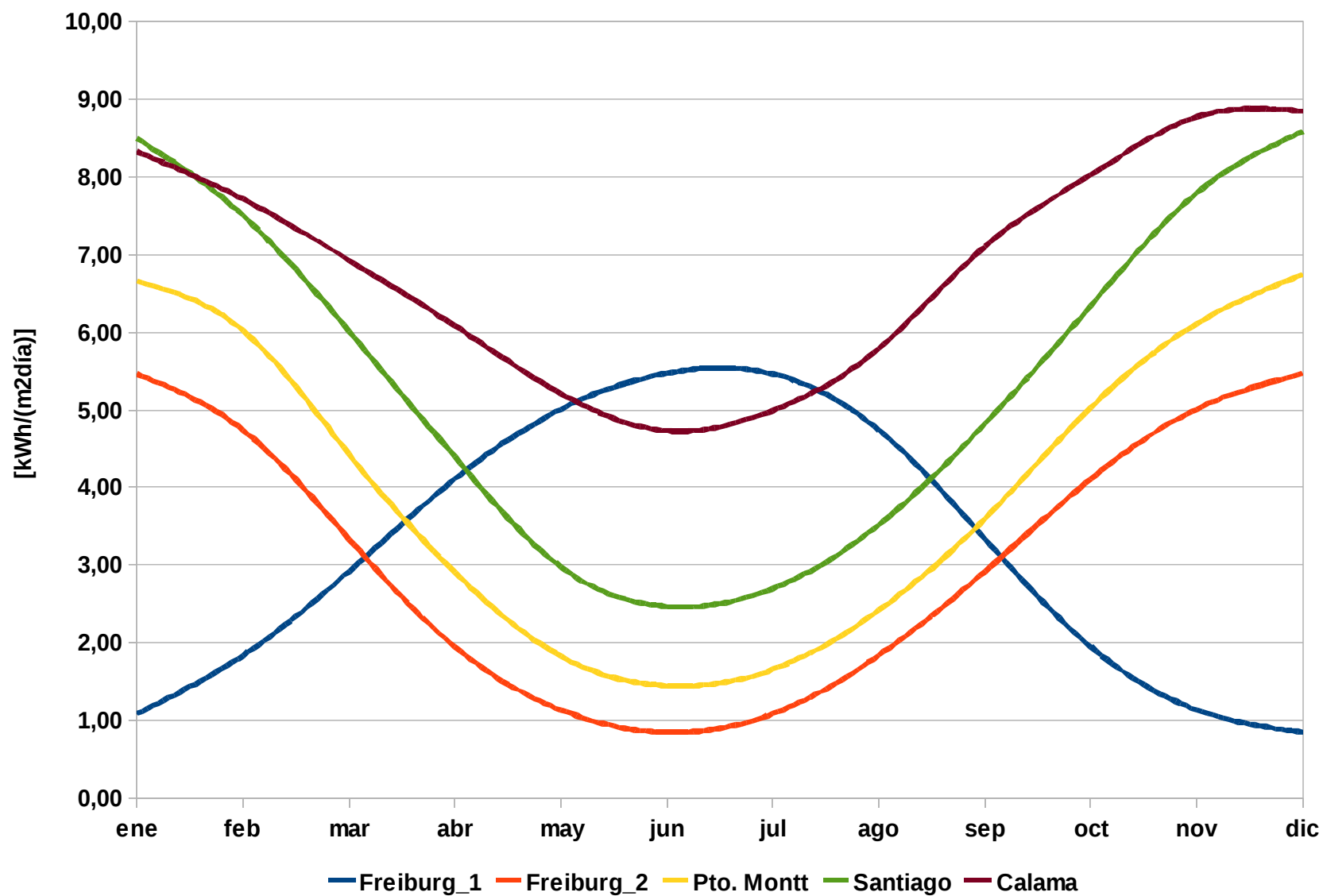












Recurso Solar en Chile

- El recurso solar en Chile es muy superior al Europeo.
- La energía solar disponible en la mayor parte del territorio es muy superior a más del 80% de Europa.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

La radiación solar propiamente tal la podemos utilizar en forma directa solo como *iluminación*. Si queremos aprovecharla con otros fines, típicamente la misma se debe *convertir* en otra forma de energía. Los tres métodos de conversión de la energía solar son:

- **Conversión biológica:** es lo que hacen las plantas por medio de la fotosíntesis. Las hojas de las plantas (más bien su clorofila) captan los fotones de la radiación solar y aprovechan esta energía para "fabricar" productos químicos. Así absorben radiación y convierten Carbono e Hidrógeno (Carbono proveniente del CO₂ e Hidrógeno proveniente del agua) en Carbohidratos, azúcares y otros compuestos (por ejemplo celulosa). Como subproducto liberan oxígeno a la atmósfera.
- El proceso de conversión biológica es lo que permite la existencia de la vida en la tierra como la conocemos. Antes de que existieran las plantas fotosintéticas existía vida en la tierra (solo en los mares), pero la atmósfera no tenía oxígeno y el UV bombardeaba la superficie terrestre. La presencia de oxígeno en la atmósfera permite la existencia de los animales. En efecto, los animales absorben el oxígeno atmosférico, liberan CO₂ y se comen a las plantas (u otros animales), sacando de allí la energía para sobrevivir. Así que las plantas son verdaderas factorías energéticas.

Métodos de Conversión de la Energía Solar

- **Conversión térmica:** en este caso la radiación solar simplemente se transforma en *calor*. Es el método de conversión más sencillo que existe. Está detrás del ciclo hidrológico y el ciclo de los vientos. Pero con tecnología podemos aumentar mucho su eficacia y además lograr temperaturas de trabajo muy elevadas.
- **Conversión Directa:** es el más reciente método de conversión de la energía solar. Consiste en transformar la misma *directamente* en energía eléctrica. También se conoce como *fenómeno fotoeléctrico*. Solo se descubrió a fines del Siglo XIX y su explicación física data de los trabajos de Albert Einstein a inicios del siglo XX (donde se introduce el concepto de fotón). La primera fotocelda *práctica* data recién de 1954 por el descubrimiento de los Laboratorios Bell de las celdas solares. Hoy es una real opción de generación eléctrica, con una producción mundial de celdas que supera las decenas de Megawatts de capacidad al año.

Conversión Térmica

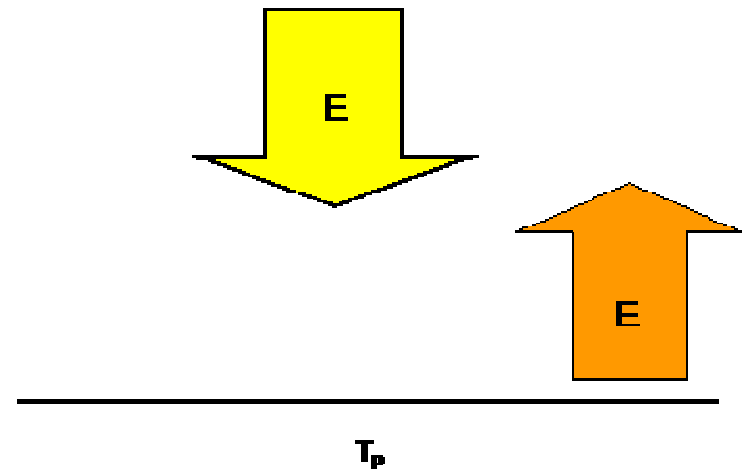
- El principio básico de funcionamiento de un sistema térmico de conversión de energía solar se basa en que existe una superficie receptora que *absorbe* la mayor parte del espectro solar incidente (la radiación solar en la práctica llega en longitudes de onda de 0,3 a 2,5 μm). El receptor, al calentarse, intercambia calor con el ambiente por medio de *radiación, convección y conducción*. Mientras mayor sea la diferencia de temperatura con el ambiente, mayores serán las pérdidas.
- Al equilibrio, se tiene que:
- $\alpha \cdot \tau \cdot E = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + E_{\text{util}}$

Conversión Térmica

- El término de la izquierda representa la radiación absorbida, siendo E la incidente y el término $\alpha \cdot \tau$ representa el cociente absorción-transmisión de la radiación solar entre cubierta transparente y superficie absorbente. Si además se usara un espejo (reflector) sería necesario incorporar el coeficiente de reflexión (ρ) del material reflectante.

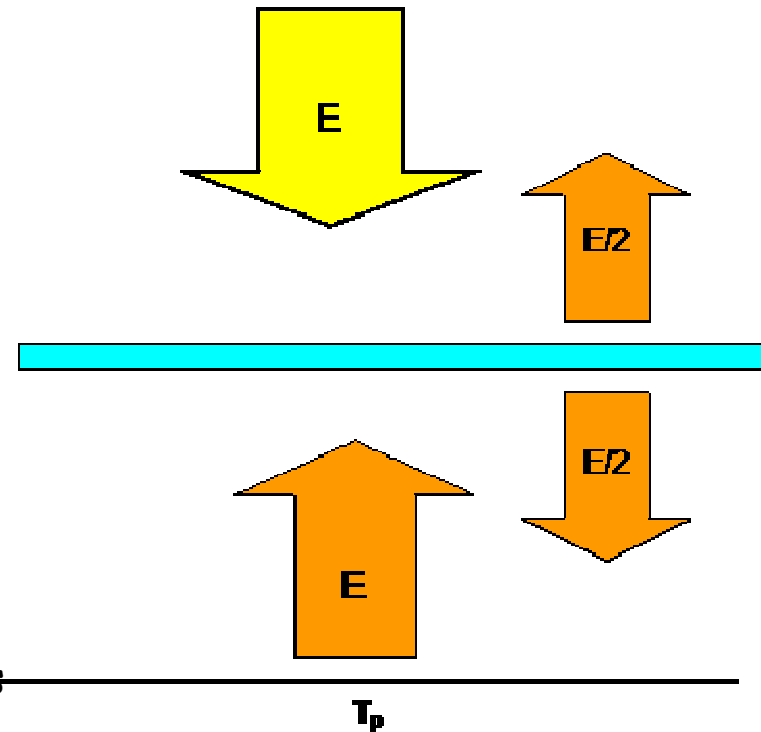
Colectores planos

- En el colector plano, se tiene una superficie captora que a la vez está recubierta de una superficie transparente para reducir las pérdidas térmicas por el frente. Esta típicamente aprovecha el *efecto invernadero*.
- Antes comprendamos como funciona una superficie negra expuesta al sol:



Colectores planos

- En el *efecto invernadero* la superficie de vidrio absorbe la radiación en onda larga que emite la placa absorbente y la vuelve a emitir por ambas caras.
- Lo que se reemite hacia el fondo se vuelve a absorber, con lo cual las pérdidas por radiación se reducen a la mitad.
- El efecto neto es que es posible alcanzar mayores temperaturas antes de que las pérdidas térmicas igualen la ganancia solar



Transferencia básica

En otra parte de este curso se vio que en un sistema solar térmico, en régimen permanente, se produce un balance de energía entre la que incide sobre el sistema captor y la que este mismo sistema aprovecha y pierde hacia el medio ambiente. Esto lo podemos plantear desde el punto de vista matemático como:

$$\alpha \cdot \tau \cdot E = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{util}$$

Esta ecuación simplemente nos dice que la energía que absorbe el sistema captor (y por lo tanto está afecta a las pérdidas ópticas de transmisión y absorción), debe ser igual a las pérdidas por convección, conducción y radiación, más la energía útil.

Transferencia básica

Cada una de estas pérdidas es aproximadamente igual a:

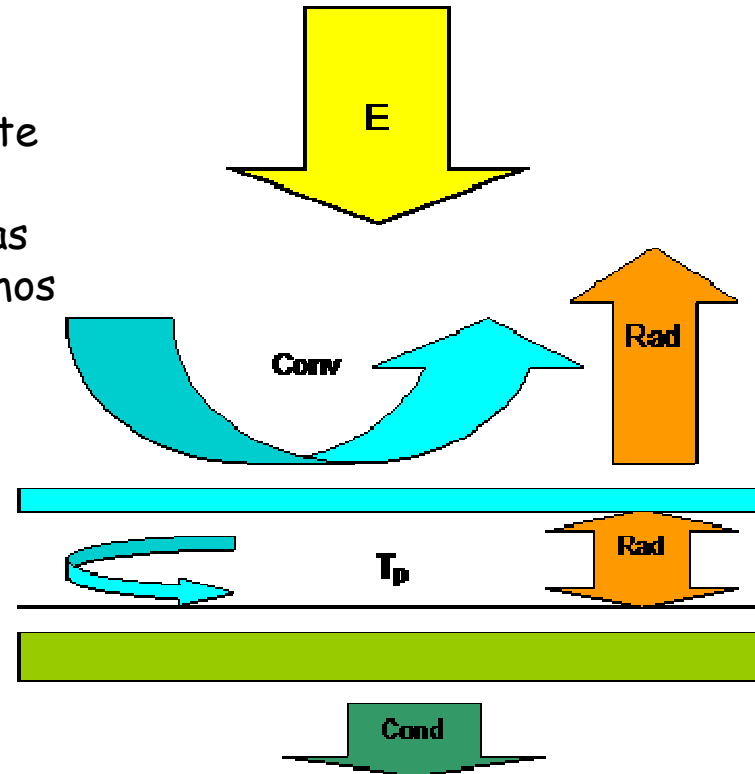
$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_a^4)$$

$$Q_{conv} = K(T_p - T_a)$$

$$Q_{cond} = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_p - T_a)$$

Colectores planos

- La cubierta transparente permite reducir las pérdidas por convección hacia el exterior y las pérdidas por radiación. Si aislamos el fondo y costados, además se reducen las pérdidas por conducción.
- En este caso el mecanismo dominante de pérdidas para temperaturas altas de receptor pasa a ser la *radiación*.



Retscreen

- Programa gratuito para análisis de factibilidad preliminar de proyectos energéticos.
- Obtenible en:

www.retscreen.net