



CLASE VII

TERMODINÁMICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA

Alejandro Medina, José Miguel Mateos Roco

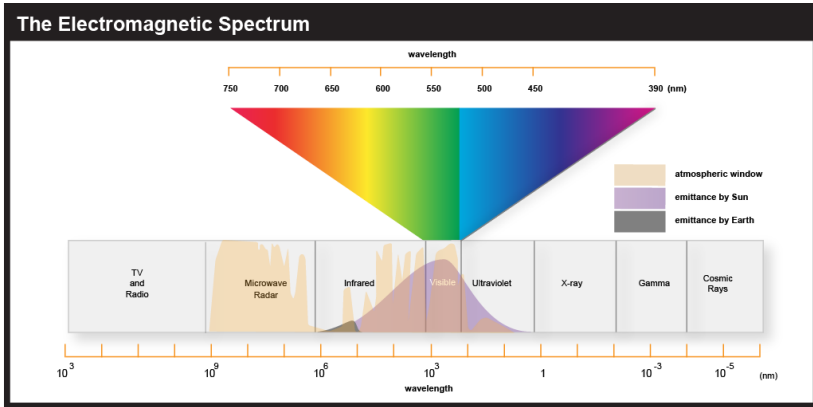
Febrero 2018

<http://campus.usal.es/gtfe>



ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y RADIACIÓN TÉRMICA

- La radiación térmica es energía electromagnética que se propaga en el espacio a la velocidad de la luz.
- Para la mayor parte de aplicaciones de energía solar la radiación térmica es la más importante.
- La radiación térmica es emitida por los cuerpos en función de su temperatura: electrones, átomos y moléculas son excitados a niveles de energía superiores o decaen a niveles inferiores absorbiendo o emitiendo fotones.
- La emisión se debe a cambios en estados electrónicos, rotacionales o vibracionales, con diversas longitudes de onda características.





ESQUEMA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ESTADÍSTICA DE FOTONES
- 3 PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER
- 4 EFICIENCIA Y OPTIMIZACIÓN
- 5 MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN



ESQUEMA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ESTADÍSTICA DE FOTONES
- 3 PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER
- 4 EFICIENCIA Y OPTIMIZACIÓN
- 5 MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN



FOTONES

- Los **fotones** son partículas relativistas con masa cero y energía:

$$E = h\nu$$

donde ν es su frecuencia y h la constante de Planck:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s.}$$

- Su **momento lineal** es

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

donde c es la velocidad de la luz: $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$

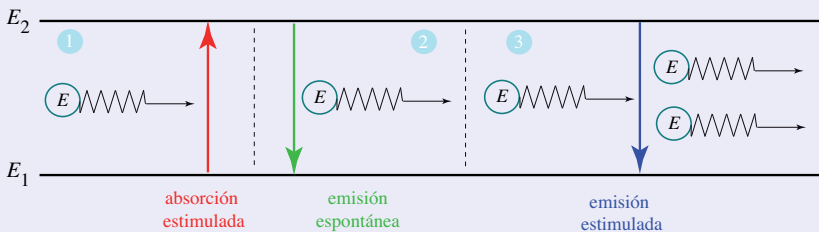
- Su **longitud de onda** viene dada por:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA

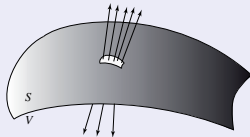
Los fotones no interactúan entre sí, sólo con la materia.

MODELO DE EINSTEIN



Para el estudio de la conversión solar fototérmica es necesario conocer la distribución espectral de fotones, $n(E)$, emitida por una superficie a una cierta temperatura: número de fotones emitidos con una energía entre E y $E + dE$.

RADIACIÓN EN UNA CAVIDAD



- Número de fotones encerrados en una cavidad (vacía) V que llegan a la superficie S con energía entre E y $E + dE$ por unidad de superficie y tiempo:

$$h(E) = \frac{2\pi}{c^2 h^3} E^2$$

- Número de fotones que abandonan el volumen V :

$$\epsilon(E)h(E)$$

$\epsilon(E)$: emisividad de la superficie.

Casos particulares: $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon(E) = \epsilon = \text{cte.} \rightarrow \text{Cuerpo gris} \\ \epsilon = 1 \rightarrow \text{Cuerpo negro (perfecto absorbedor y emisor de radiación)} \end{array} \right.$



INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA

Ley de Planck:

Número de fotones por unidad de tiempo y superficie con una energía entre E y $E + dE$ emitidos por un material a temperatura T :

$$n(E) = \epsilon(E)h(E)f(E)$$

donde $f(E)$ es la probabilidad de que un nivel de energía E esté ocupado por un e^- .

$$n(E) = \epsilon(E) \frac{2\pi}{c^2 h^3} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1}$$

$k = R/N_A$: constante de Boltzmann, relación entre la energía de una partícula individual y la temperatura de un sistema

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

FLUJO Y ENERGÍA

FLUJO Y ENERGÍA PARA UN CUERPO GRIS

- Flujo total de fotones por unidad de tiempo y área (emisividad constante):

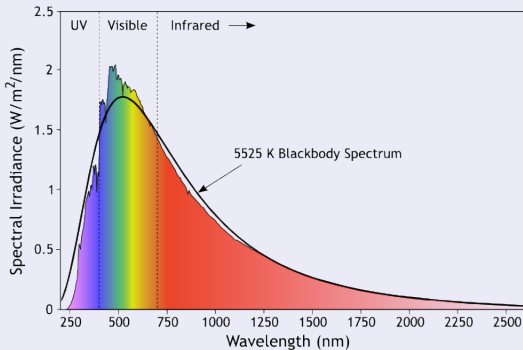
$$N = \int_0^{\infty} n(E) dE = \epsilon \frac{2\pi}{c^2 h^3} (kT)^3 \int_0^{\infty} \frac{x^2}{e^x - 1} dx = 1,20206 \epsilon \frac{4\pi k^3}{c^2 h^3} T^3$$

- Energía total emitida por el cuerpo (*Ley de Stefan-Boltzmann*):

$$Q = \int_0^{\infty} E n(E) dE = \dots = \epsilon \sigma T^4$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

ESPECTRO SOLAR EXPERIMENTAL Y LEY DE PLANCK



La temperatura media del Sol se puede estimar comparando ambos espectros:

$$E n(E) = A \frac{E^3}{\text{Exp}\left(\frac{E}{kT_s}\right) - 1} \rightarrow T_s \simeq 5500 \sim 5800 \text{ K}$$

ESPECTRO SOLAR EXPERIMENTAL Y LEY DE PLANCK

- Energía total emitida por el Sol por unidad de tiempo si se comporta como un cuerpo negro: $\sigma T_s^4(4\pi R_s^2)$
- Esa energía se distribuye en todas direcciones y a la distancia media de la Tierra al Sol se expresa como: $G_0(4\pi r_0^2)$ donde G_0 se denomina *constante solar*:

$$\sigma T_s^4(4\pi R_s^2) = G_0(4\pi r_0^2)$$

$$\implies G_0 = \frac{R_s^2}{r_0^2} \sigma T_s^4 \equiv f \sigma T_s^4 = 1353 \text{ W/m}^2 = 1,353 \text{ soles}$$

$$f = \frac{R_s^2}{r_0^2} : \text{factor de dilución} \left\{ \begin{array}{l} R_s : \text{radio del Sol} \longrightarrow 696 \text{ Mm} \\ r_0 : \text{distancia media Tierra-Sol} \longrightarrow 150 \text{ Gm} \end{array} \right.$$

G_0 representa la energía por unidad de tiempo y área recibida en la Tierra (fuera de la atmósfera terrestre) del Sol. También se llama *irradiancia solar estándar*.

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DE LA TIERRA

- Suponemos que la Tierra se comporta como un **cuerpo negro** que emite a la temperatura T_T la radiación que recibe del Sol. Si llamamos R_T a su radio:

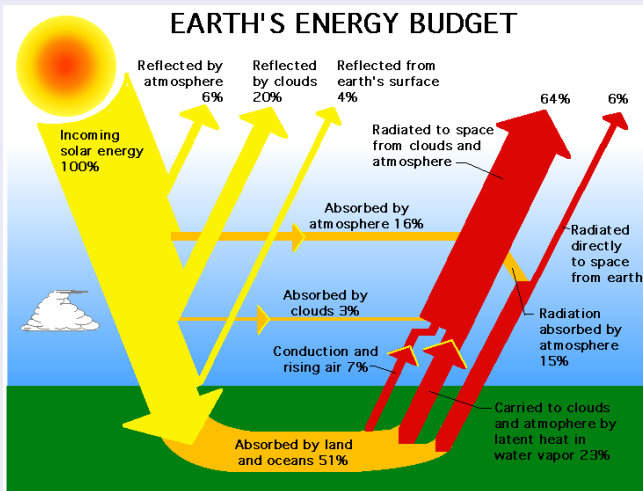
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación emitida por la Tierra} \rightarrow \sigma T_T^4 (4\pi R_T^2) \\ \text{Irradiancia recibida del Sol} \rightarrow f\sigma T_S^4 (\pi R_T^2) \end{array} \right.$$

- La Tierra emite en todas direcciones ($4\pi R_T^2$), pero sólo recibe la radiación solar su **sección eficaz** vista desde el Sol (πR_T^2).
- **Flujo neto de energía** (energía por unidad de tiempo):

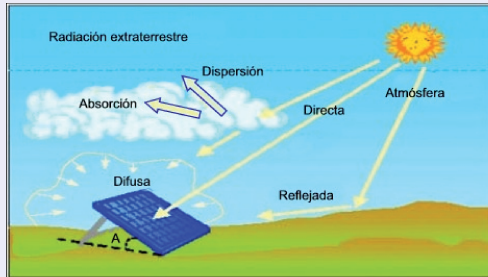
$$Q = 4\pi R_T^2 \sigma \left(\frac{f}{4} T_S^4 - T_T^4 \right)$$

- En equilibrio térmico: $Q = 0 \rightarrow \left(\frac{f}{4} T_S^4 - T_T^4 \right) \rightarrow T_T = 278 \text{ K}$
Valor experimental: $T_T \simeq 288 \text{ K}$ (diferencia $\sim 3,5\%$).

RADIACIÓN DIRECTA Y RADIACIÓN DIFUSA



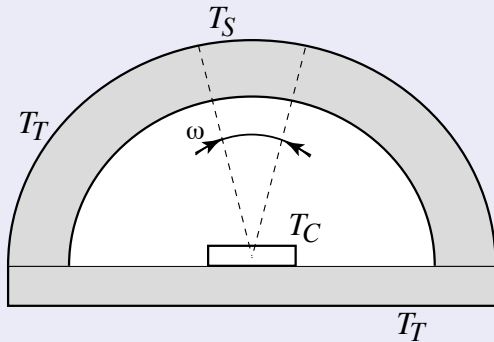
RADIACIÓN DIRECTA Y RADIACIÓN DIFUSA



- **Radiación directa:** llega del foco solar sin reflexiones o refracciones intermedias
- **Radiación difusa:** proviene de las reflexiones y refracciones en la atmósfera, las nubes y demás elementos

REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA

Consideremos un **colector solar a temperatura T_C** que recibe radiación solar directa y difusa.



Flujo neto de energía:

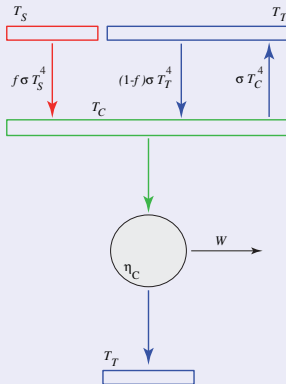
$$Q = f\sigma T_S^4 + (1-f)\sigma T_T^4 - \sigma T_C^4$$



ESQUEMA

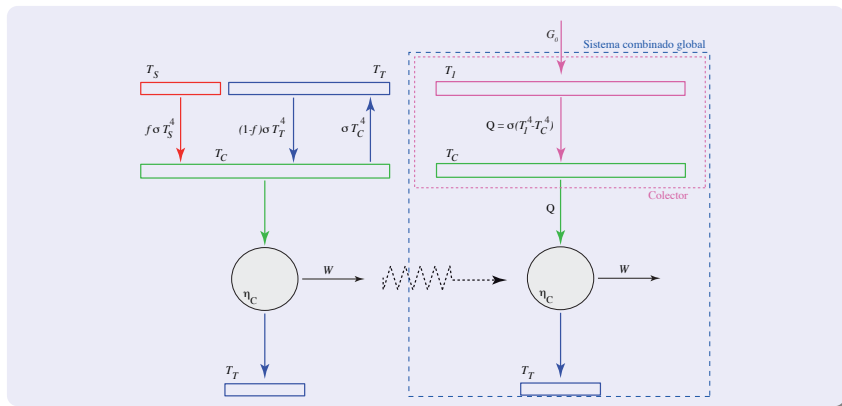
- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ESTADÍSTICA DE FOTONES
- 3 PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER
- 4 EFICIENCIA Y OPTIMIZACIÓN
- 5 MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN

PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER (1957)



Se considera que la conductancia en el intercambio de calor con la fuente fría es ∞ .

PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: SISTEMA EQUIVALENTE



$$Q = f\sigma T_S^4 + (1-f)\sigma T_T^4 - \sigma T_C^4 = \sigma(T_I^4 - T_C^4) \implies T_I = f [T_S^4 - (1-f)T_T^4]^{1/4} \approx 5^{1/4} T_T = \left(\frac{5f}{4}\right)^{1/4} T_S \approx 431 \text{ K}$$



ESQUEMA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ESTADÍSTICA DE FOTONES
- 3 PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER
- 4 EFICIENCIA Y OPTIMIZACIÓN
- 5 MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN

DEFINICIONES DE EFICIENCIA

- Eficiencia del sistema combinado:

$$w = \frac{|W|}{G_0} = \frac{|W|}{f\sigma T_S^4} = \frac{|Q|}{G_0} \frac{|W|}{|Q|} = \eta_{\text{colector}} \eta_C$$

- Eficiencia del colector:

$$\eta_{\text{colector}} = \frac{|Q|}{G_0} = \frac{|Q|}{f\sigma T_S^4}$$

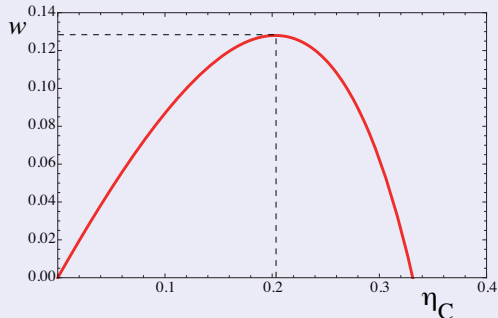
- Eficiencia de la máquina considerando que realiza un ciclo de Carnot:

$$\eta_C = \frac{|W|}{|Q|} = \frac{|W|}{f\sigma T_S^4 + (1-f)\sigma T_T^4 - \sigma T_C^4} = 1 - \frac{T_T}{T_C}$$

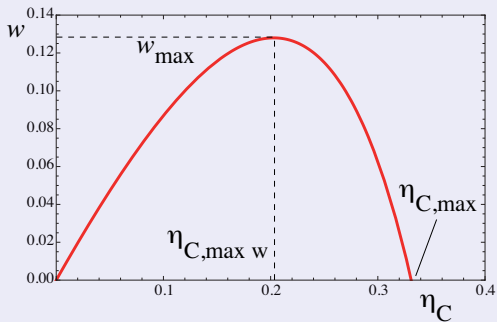
RELACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA GLOBAL, w , Y LA EFICIENCIA DE LA MÁQUINA TÉRMICA, η_C

Con las definiciones anteriores se puede obtener una relación entre w y η_C :

$$w \simeq \eta_C \frac{5(1 - \eta_C)^4 - 1}{4(1 - \eta_C)^4}$$



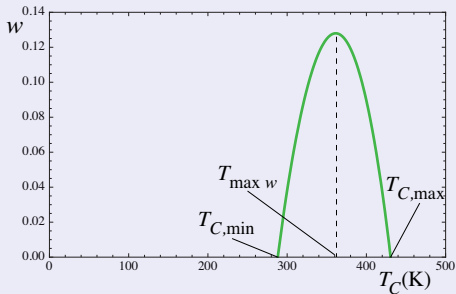
VALORES MÁXIMOS DE LAS EFICIENCIAS



$$\frac{dw}{d\eta_C} = 0 \rightarrow \begin{cases} \eta_{C,\max w} = 0,203 \\ w_{\max} = 0,13 \end{cases}$$

$$w = 0 \rightarrow \begin{cases} \eta_{C,\min} = 0 \\ \eta_{C,\max} = 0,33 \end{cases}$$

EFICIENCIA Y TEMPERATURA DEL COLECTOR



$$w = 0 \rightarrow \begin{cases} T_{C,min} = 288 \text{ K} \\ T_{C,max} = 431 \text{ K} \end{cases}; \quad T_{max w} = 362 \text{ K}$$

En este caso optimizar la potencia es equivalente a optimizar el rendimiento global porque $|W| = Gw$.



ESQUEMA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 ESTADÍSTICA DE FOTONES
- 3 PLANTEAMIENTO TERMODINÁMICO: MÁQUINA DE MÜSER
- 4 EFICIENCIA Y OPTIMIZACIÓN
- 5 MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN

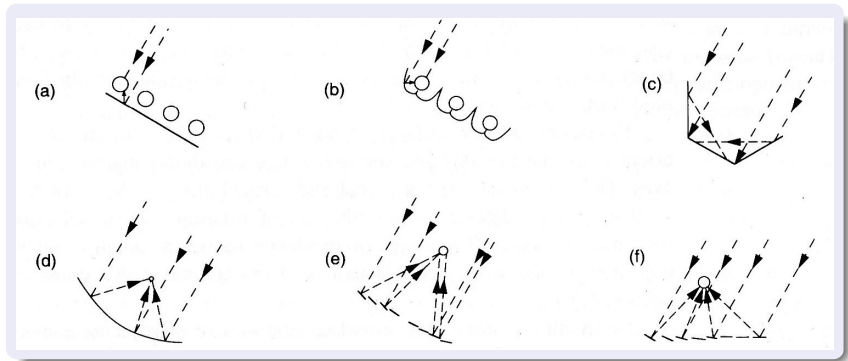


MÁQUINA DE MÜSER CON CONCENTRACIÓN

CONCENTRACIÓN

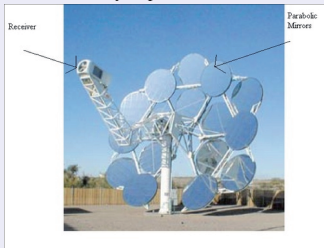
- Por medio de espejos, lentes o combinaciones de ambos es posible concentrar la radiación solar en un área pequeña.
- **Ventajas:** menores pérdidas en comparación con un receptor plano para la misma temperatura (menor área)
- **Inconvenientes:** deben *seguir* la posición del Sol, mantenimiento y durabilidad de los componentes ópticos

TIPOS DE CONCENTRADORES



TIPOS DE CONCENTRADORES

Array of parabollic mirrors



Parabolic troughs



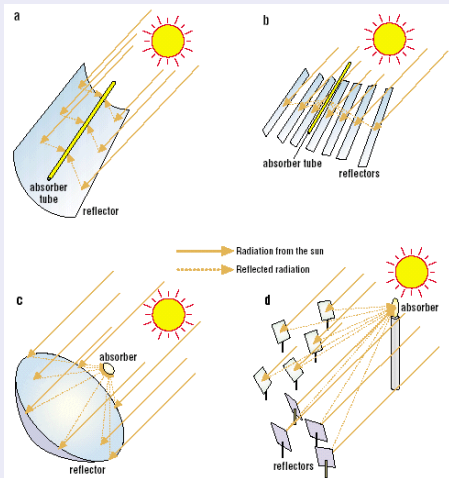
Dish Stirling



Helisotat Tower plant



TIPOS DE CONCENTRADORES



MÁXIMA CONCENTRACIÓN

Factor de concentración:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \rightarrow \begin{cases} A_a : \text{área de apertura} \\ A_r : \text{área de recepción} \end{cases}$$

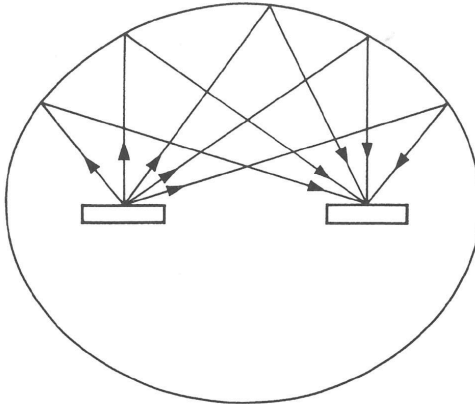
- Máxima concentración posible, C_{\max} : todos los rayos que salen del Sol por unidad de área se concentran en la Tierra en la misma área.
- Calor recibido del Sol en la apertura: $Q_{sr} = A_a f \sigma T_s^4$
- Calor emitido por el receptor: $Q_{rs} = A_r \sigma T_C^4$
- En el límite $T_C \rightarrow T_S$ y en equilibrio se obtiene la máxima concentración posible:

$$C_{\max} = \frac{1}{f} = 46300$$

- En general:

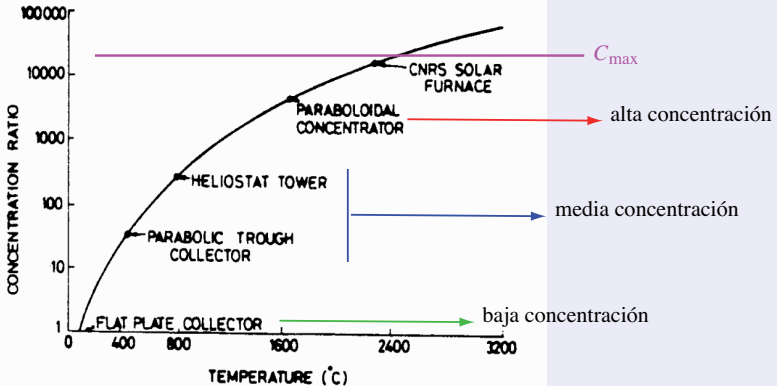
$$1 \leq C \leq \frac{1}{f}$$

CONCENTRADOR IDEAL

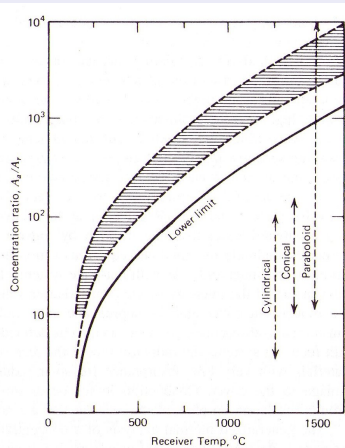


El concentrador ideal es irrealizable, sería un espejo elíptico con el sol en uno de sus focos y la tierra en el otro.

FACTOR DE CONCENTRACIÓN Y TEMPERATURA DEL COLECTOR



FACTOR DE CONCENTRACIÓN Y TEMPERATURA DEL COLECTOR





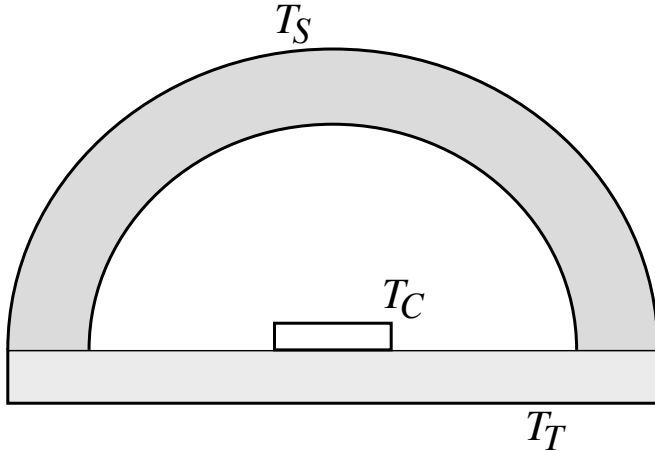
FACTOR DE CONCENTRACIÓN Y TEMPERATURA DEL COLECTOR

Solar energy collectors

Motion	Collector type	Absorber type	Concentration ratio	Indicative temperature range (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30–80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50–200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1–5	60–240
Single-axis tracking			5–15	60–300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10–40	60–250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15–45	60–300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	10–50	60–300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100–1000	100–500
	Heliostat field collector (HFC)	Point	100–1500	150–2000

Note: Concentration ratio is defined as the aperture area divided by the receiver/absorber area of the collector.

ENERGÍA INCIDENTE CON CONCENTRACIÓN





ENERGÍA INCIDENTE CON CONCENTRACIÓN

$$Q = Cf\sigma T_S^4 + (1 - Cf)\sigma T_T^4 - \sigma T_C^4$$

En este caso la temperatura efectiva T_1 resulta:

$$T_1 = [CfT_S^4 + (1 - Cf)T_T^4]^{1/4}$$

que es mayor que en el caso sin concentración.

$$5^{1/4} T_T \leq T_1 \leq T_S$$

EFICIENCIAS CON CONCENTRACIÓN

- Eficiencia del sistema global:

$$w = \frac{|W|}{Cf\sigma T_S^4}$$

- Eficiencia térmica:

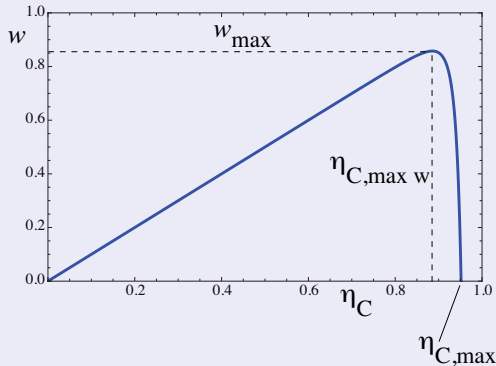
$$\eta_C = \frac{|W|}{|Q|}$$

Despejando w en función de η_C :

$$w = \eta_C \frac{(4C + 1 - Cf)(1 - \eta_C)^4 - 1}{4C(1 - \eta_C)^4}$$

EFICIENCIA CON CONCENTRACIÓN MÁXIMA

$$C_{\max} = \frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad w = \eta_C \left[1 - \frac{f}{4(1 - \eta_C)^4} \right]$$



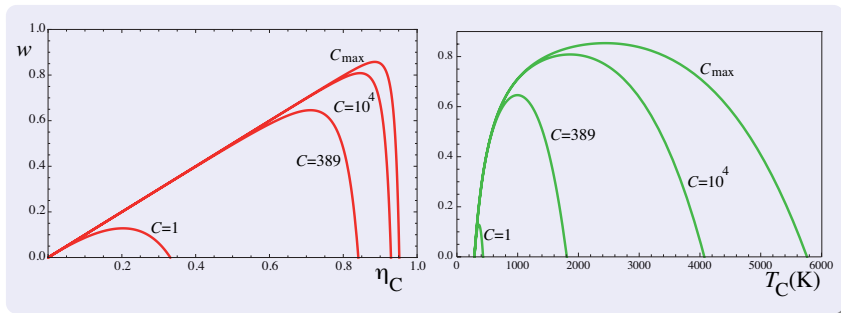


VALORES MÁXIMOS CON CONCENTRACIÓN MÁXIMA

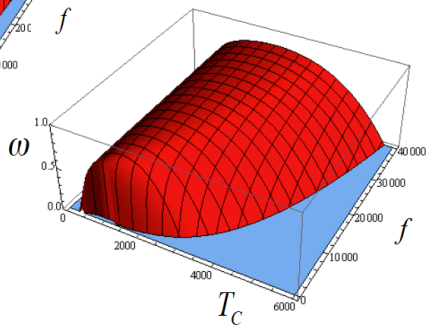
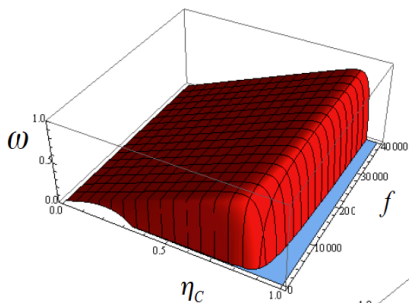
$$\frac{dw}{d\eta_C} = 0 \longrightarrow (1 - \eta_C)^5 + \frac{3}{4}f(1 - \eta_C) - f = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{\max} = 0,8536 \\ \eta_{C,\max w} = 0,8824 \\ T_{C,\max w} = 2443,2 \text{ K} \end{array} \right.$$

EFICIENCIA CON CONCENTRACIÓN ARBITRARIA



C	w_{max} [Δ (%)]	$\eta_{C,max} w$ [Δ (%)]	$T_{C,max} w$ (K) [Δ (%)]
1	0.1279	0.2029	361.31
389	0.6459 [405]	0.7111 [250]	996.89 [180]
10000	0.8084 [532]	0.8453 [317]	1862.52 [415]
46300	0.8536 [568]	0.8824 [335]	2443.23 [576]







BIBLIOGRAFÍA

- A. De Vos,
Thermodynamics of Solar Energy Conversion, Wiley (2008).
- A. Bejan,
Advanced Engineering Thermodynamics, Wiley (2006).
- J.A. Duffie and W.A. Beckman,
Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley (2006).



FIN