



Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial-Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

**Instrucciones:** En las preguntas de test añadida entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

**Capítulo 7: Energía solar. Geometría solar y radiación. Recurso y perfiles productivos.**

- ( F ) Las mediciones ordinarias de radiación solar son de su componente directa.
- ( F ) El índice de claridad  $K_T$  da el cociente entre la irradiación en la superficie normal al sol y la extraterrestre.
- ( V ) La magnitud de la radiación solar difusa horaria puede ser mayor en un día nublado que en un día totalmente despejado a la misma hora.
- ( F ) Es habitual que los captadores solares térmicos planos operen normalmente con eficiencias energéticas similares a las de las células PV sin concentración comerciales actuales.
- ( F ) Es posible con la tecnología actual obtener altas temperaturas sin concentración solar. Cte. De Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

**Una instalación de frío solar consta de un campo de captadores solares térmicos planos de alta eficiencia idénticos, que por medio de un circuito cerrado de agua en circulación común, sin pérdidas ni acumulaciones, alimenta una máquina de absorción, que actúa de bomba de calor entre un recinto refrigerado y el ambiente a temperatura  $t_{amb}$  con sus dos correspondientes circuitos cerrados de agua. La fuerza motriz única para la máquina de absorción es el agua caliente que producen los captadores. El calor bombeado, junto con el calor motriz, son conjuntamente evacuados al ambiente por medio de una torre de refrigeración, sin que sea apreciable otra fuga de calor entre la máquina y el ambiente. Así pues, esta máquina actúa entre tres temperaturas.**

DATOS: La ecuación característica del campo de colectores que rinde la potencia calorífica  $\dot{Q}_s$  comunicada al agua con temperatura media entre la entrada y salida de captadores  $t_s$  es:  $\dot{Q}_s = \eta_o \left[ 1 - \frac{t_s - t_{amb}}{t_{st} - t_{amb}} \right] G_T A_s$ . Donde  $G_T$  es la

irradiancia total sobre el área de apertura  $A_s$ ,  $\eta_o$  es un rendimiento óptico constante y  $t_{st}$  es la temperatura de estancamiento del captador (a caudal de agua caliente nulo), constante. Las expresiones de las potencias caloríficas motriz y frigorífica de la máquina de absorción como función lineal de las temperaturas medias entre la entrada y la salida de sus circuitos externos: motriz  $t_g$ , de refrigeración  $t_e$ , y de evacuación  $t_{ac} = t_{amb} + 5^\circ\text{C}$  son:

$\dot{Q}_g / \dot{Q}_{nom} = 0,2 + 0,051 \Delta\Delta t / ^\circ\text{C}$ ;  $\dot{Q}_e / \dot{Q}_{nom} = 0,09 + 0,042 \Delta\Delta t / ^\circ\text{C}$ , donde  $\dot{Q}_{nom}$  es la potencia nominal frigorífica de la máquina de absorción en unas temperaturas estándar.  $\Delta\Delta t = t_g - 2,5 t_{ac} + 1,8 t_e$  es la diferencia de temperatura característica, función lineal de las temperaturas, medias también, de los circuitos externos, los cuales carecen de pérdidas.

Mostrar y razonar sobre la base de un balance de energía cuasi-estacionario que  $t_s = t_g$  y que  $\dot{Q}_s = \dot{Q}_g$ .

Tomemos una masa de control (o volumen de control sin entrada ni salida de masa) que comprenda el circuito de agua. Dado que no hay pérdidas ni acumulaciones, la potencia entrante es igual a la potencia saliente en condiciones cuasi-estacionarias. Luego, el estado del fluido es cuasi-estacionario también y con ello las temperaturas. El calor entrante se emplea en subir la temperatura, con la consecuencia que la bajada de temperatura ha de ser la misma en la máquina. Luego todas las temperaturas son cuasi-estacionarias y con ello las medias entre entrada y salida.



Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

**Instrucciones:** En las preguntas de test añadida entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

Obtener la expresión analítica de la eficiencia de toda la instalación de frío solar sobre la base de la irradiancia como función exclusiva de  $t_s$ ,  $t_{st}$ ,  $t_e$  y  $t_{amb}$  además de parámetros numéricos:

$$\eta_{sf} = \frac{\dot{Q}_e}{A_s G_T} = \eta_o \left[ 1 - \frac{t_s - t_{amb}}{t_{st} - t_{amb}} \right] \frac{\eta_f = \dot{Q}_e / \dot{Q}_g}{0,2 + 0,051 \left[ t_s - 2,5(t_{amb} + 5^\circ\text{C}) + 1,8t_e \right] / ^\circ\text{C}}$$

Tome valores característicos de  $t_s = 90^\circ\text{C}$ ,  $t_{amb} = 30^\circ\text{C}$  y  $t_e = 15^\circ\text{C}$  y calcule las eficiencias del campo de colectores, de la máquina frigorífica y de frío solar con  $\eta_o = 0,75$  y  $t_{st} = 200^\circ\text{C}$ :

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}_s}{A_s G_T} = \eta_o \left[ 1 - \frac{t_s - t_{amb}}{t_{st} - t_{amb}} \right] = 0,485$$

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{0,09 + 0,042 \left[ t_s - 2,5(t_{amb} + 5^\circ\text{C}) + 1,8t_e \right] / ^\circ\text{C}}{0,2 + 0,051 \left[ t_s - 2,5(t_{amb} + 5^\circ\text{C}) + 1,8t_e \right] / ^\circ\text{C}} = \frac{1,329 \dot{Q}_{nom}}{1,7045 \dot{Q}_{nom}} = 0,78$$

$$\eta_{sf} = \eta_s \eta_f = 0,378$$

En estas mismas condiciones y si  $\dot{Q}_{nom} = 100 \text{ kW}_f$ , determine las potencias de frío y la que ha de producir el campo de captadores solares.

$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_e = 1,329 \times \dot{Q}_{nom} = 132,9 \text{ kW}_f$$

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_g = 1,7045 \times \dot{Q}_{nom} = 170,5 \text{ kW}_f$$

Determine la superficie de captadores necesarios si el día crítico despejado puede considerarse el 15 de julio para una instalación en Leganés (Latitud  $\phi = 40,33^\circ$ ; y longitud  $\theta = -3,77^\circ$  con respecto al meridiano de Greenwich) con inclinación de colectores  $\beta = 40^\circ$  mirando al Sur,  $\alpha = 0$ . Para ello se sugiere la siguiente secuencia:

$$\text{Día del año: } n = 196 \quad \text{Declinación: } \delta = 23,45^\circ \text{sen} \left( 360^\circ \frac{284+n}{365} \right) = 21,5^\circ$$

Ecuación del tiempo resultando:  $E = -347 \text{ s}$ ; Altura geográfica:  $z = 655 \text{ m}$ ; Adelanto horario oficial:  $A = 2 \text{ h}$

$$\text{Hora solar: } t_{sv} = t_o + 240 \frac{\text{s}}{^\circ} \underbrace{(\theta - \theta_{ref})}_{>0 \text{ hacia el este}} + E - A = 12\text{h} + 240 \frac{\text{s}}{^\circ} (-3,777^\circ - 0^\circ) - 347\text{s} - 2\text{h} = 9,652 \text{ h}$$

Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

**Instrucciones:** En las preguntas de test añadida entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

Se considera válido  $t_o = 12$  h o aquella hora que proporcione  $t_{sv} = 12$ h u otra hora, p. e. la que maximice la producción.

$$\text{Ángulo horario del sol: } \omega = 360^\circ \frac{t_{sv} - 12}{24} = -35,2^\circ = -0,615$$

Ángulo de incidencia solar al captador:

$$\theta_s = \arccos \left\{ \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \alpha) + \cos \delta \left[ \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \sin \beta (\sin \phi \cos \alpha \cos \omega + \sin \alpha \sin \omega) \right] \right\} = 40,4^\circ = 0,704 \text{ rad}$$

$$\text{Ángulo cenital del sol: } \theta_{zs} =$$

Se obtiene de la anterior haciendo  $\beta = 0$ ,

$$\text{pues es la altura angular c. r. al horizonte: } \arccos(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) = 35,22^\circ = 0,615 ; R_b = \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} = 0,934$$

$$\text{Irradiancia extraterrestre: } G_{o,n} = 1.367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360^\circ n}{365} \right) \right] = 1.323 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Modelo de Hottel para la estimación de la irradiación directa y difusa sobre la superficie terrestre horizontal:

$$G_b = G_{o,n} \cos \theta_{zs} \tau_b ; \tau_b = a_0 + a_1 \exp \left( \frac{-k}{\cos \theta_{zs}} \right) \quad \tau_b = 0,646$$

$$G_d = \underbrace{G_{o,n} \cos \theta_{zs}}_{G_o} \tau_d ; \tau_d = 0,271 - 0,294 \tau_b$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 0,97 \left[ 0,4237 - 0,008216 \left( 6,0 - \frac{z}{\text{km}} \right)^2 \right] \\ a_1 = 0,991 \left[ 0,5055 + 0,00595 \left( 6,5 - \frac{z}{\text{km}} \right)^2 \right] \\ k = 1,02 \left[ 0,271 + 0,01858 \left( 2,5 - \frac{z}{\text{km}} \right)^2 \right] \end{array} \right.$$

$$G_b = 698 \text{ W/m}^2 \quad G_d = 87,7 \text{ W/m}^2 \quad G = 786 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Irradiancia total sobre el captador: } G_T = G_{o,n} \cos \theta_s \tau_b + G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G_{\rho_g} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) = 749 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{W/m}^2$$

Ecuación de balance energético del sistema:

$$A_s G_T \eta_s = \dot{Q}_s \Rightarrow A_s = \frac{\dot{Q}_s}{G_T \eta_s} = \frac{170,5 \text{ kW}}{749 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} 0,485} = 468,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie de captadores; } A_s = \text{ m}^2$$

Calcule el coste unitario del frío producido asumiendo que no se obtiene otra producción de la instalación. Para ello asuma un coste unitario del parque solar instalado de 300 €/m<sup>2</sup> y de la máquina de 1.000 €/kW<sub>f</sub> lo cual ya incluye una subvención. Asuma una tasa de interés anual  $i = 5\%$ , con una vida operativa útil de 20 años, al cabo de la cual los valores

$$FRC(i, n) = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}$$

residuales son nulos. La expresión del factor de recuperación de capital es  $C_{o\&m} = 2.000$  €/año. La temporada con demanda de frío se considera únicamente los meses enteros de mayo, junio, julio y agosto y por simplicidad se asumen eficiencias constantes durante esos meses e iguales a las calculadas anteriormente (si no la ha obtenido, indique razonadamente



Este trabajo está bajo una licencia de [Creative Commons Licencia Reconocimiento-No-Comercial- Compartirigual 3.0 España](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/).

**Instrucciones:** En las preguntas de test añadida entre los paréntesis V, F o deje en blanco según proceda, no tache ni agregue comentarios, salvo que se le solicite expresamente en el enunciado. Para que un enunciado sea verdadero, debe serlo en su totalidad. No se evaluará el texto fuera del espacio reservado para las contestaciones. Use el anverso o los márgenes para borrador o cálculos. El examen es sin ayuda de textos u otro material informativo, a excepción de una calculadora simple sin información. Las preguntas acertadas cuentan como +1/n hasta alcanzar los puntos indicados y las falladas como -1/2n en la parte tipo test o solo positivamente en los problemas, siendo n el número de cuestiones bajo un mismo encabezado. En la parte tipo test cualquier opción es posible, todas verdaderas, todas falsas o cualquier combinación de verdaderas y falsas. Lo no contestado cuenta como 0. Escriba los desarrollos matemáticos y cálculos donde se indica, de manera clara y concisa, pueden contribuir a la calificación. La comprensión de los enunciados forma parte del propio examen.

un valor representativo), pero se aplica un coeficiente empírico de  $\vartheta = 0,8$  a la producción de frío para considerar factores no tenidos en cuenta. Los datos de irradiación media sobre los colectores con la configuración indicada son:

Mes	Mayo	Junio	Julio	Agosto
$H_T (40^\circ) \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{día})$	6.170	6.770	7.210	7.130

Calcule la producción de frío estimada en toda la temporada del año:

$$\dot{Q}_f = (6,17 \times 31 + 6,77 \times 30 + 7,21 \times 31 + 7,13 \times 31) \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} 468,5 \text{m}^2 0,378 \times 0,8 = 118,8 \text{ MWh} \quad \text{MWh}_f/\text{año}$$

Una estimación de la eficiencia de los colectores solares puede ser 0,5 y de la máquina de absorción 0,7.

Calcule el coste total anualizado de la instalación.

No es necesario trasladar en el tiempo el coste de mantenimiento por darse anualmente de forma constante, o bien el sumatorio de los valores actualizados por  $FRC = 1$ .

$$\dot{C} = \left( \overbrace{300 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} 468,5 \text{ m}^2 + 1.000 \frac{\text{€}}{\text{kW}_f} 100 \text{ kW}_f}^{240.550\text{€}} \right) \left[ \frac{\overbrace{0,05}^{0,08024}}{1 - (1 + 0,05)^{-20}} \right] \text{año} + 2.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 21.302 \frac{\text{€}}{\text{año}} \quad \text{€/año}$$

Coste actualizado unitario del frío producido:

$$LCOE = \frac{\dot{C}}{\dot{Q}_f} = \frac{21.302 \text{ €/año}}{118,8 \text{ MWh}_f/\text{año}} = 179,3 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_f} \quad \text{€/MWh}_f$$