

# Fuentes de Energía

## Capítulo 8: Energía solar térmica y termoeléctrica Ejercicios, Actividades y Cuestiones de autoevaluación

### Autor:

- Antonio Lecuona Neumann. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos. Dpto. De Ingeniería Térmica y de Fluidos, [Grupo ITEA](#), [Universidad Carlos III de Madrid](#), Leganés, España.

2019

NOTA: Las variables se representan con cursiva románica y las unidades con texto normal. La dependencia funcional se representa como  $\langle \quad \rangle$ .

La información contenida en este documento sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. Por ello no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comunique e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

## 8.1.- Captadores térmicos. [Volver](#)

**Ejercicio 8.-1.-** Partiendo de la Ec. 8.2 Obtenga una expresión analítica de  $T_{m\acute{a}x} = T_{st}$ . ¿Qué valor adquiere  $F'$  en estas condiciones? y ¿Qué valor máximo alcanza  $\eta_{cap,n}$  como colector En esas condiciones?. Comente el resultado. Obtenga una expresión de  $\eta_{cap,n}$  como función de  $T_{max}$  y  $a_0$ , con  $a_2 = 0$ .

## 8.1.- Captadores térmicos. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.0:** Obtener trigonómicamente la expresión analítica  $K_l(\theta_l, f, L, \Delta L)$  para un colector Fresnel con tubo más largo que la longitud  $L$  de  $A_a$  y simétricamente dispuesto.

### 8.3.- Centrales eléctricas termosolares. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.1:** Es bien conocido que la eficiencia de los captadores disminuye al aumentar la temperatura, del fluido, mientras que la de los motores térmicos que alimentan aumenta con ella. Calcular la eficiencia global máxima de sol a trabajo  $\eta_{e,máx}$  y la **temperatura óptima** correspondiente en el receptor  $T_{op}$  de una central termosolar con pérdidas exclusivamente ópticas y por radiación, a causa de la alta temperatura alcanzada. Ocurren desde el absorbedor-receptor, construido con un material de absorbancia  $\alpha_s$  y emitancia  $\varepsilon_{IR}$ , recibiendo la irradiancia  $G_{b,T}$  con concentración geométrica  $C$ , y un rendimiento óptico solo por rayos perdidos, absorción atmosférica y reflectancia equivalente de los espejos  $\eta'_o = \rho\alpha_a\gamma$ . Se transfiere este calor sin pérdida ni degradación alguna al motor, el cual ofrece una eficiencia de conversión a trabajo  $\eta_{co}$  del 50% de la eficiencia de Carnot  $\eta_C$ , rechazando calor al ambiente a temperatura  $T_a$ . NOTA: Es semejante al motor de Stefan-Boltzmann. Se omite  $\bar{\quad}$  sobre las temperaturas medias.

**Solución:**

### 8.3.- Centrales eléctricas termosolares. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.2:** Un perfeccionamiento del modelo del motor anterior consiste en introducir conductancias térmicas constantes  $UA$  en las conexiones del motor, asumido como  $1/2$  del de Carnot o [endo-reversible](#), con las  $(UA)_s$  y  $(UA)_a$  del receptor y del cambiador de calor con el sumidero frío, como representativas de la degradación en los cambiadores de calor, y de esta manera tener en cuenta irreversibilidades  $I$  externas; motor parecido al de [Curzon-Ahlborg](#). El ciclo opera a temperatura de suministro  $T'_s$  menor que la del calor absorbido  $T$  y a temperatura de cesión del calor  $T'_a$  mayor que la ambiente, que ahora denominamos  $T_a$ . Por lo tanto la eficiencia del ciclo resulta menor.

**Solución:**

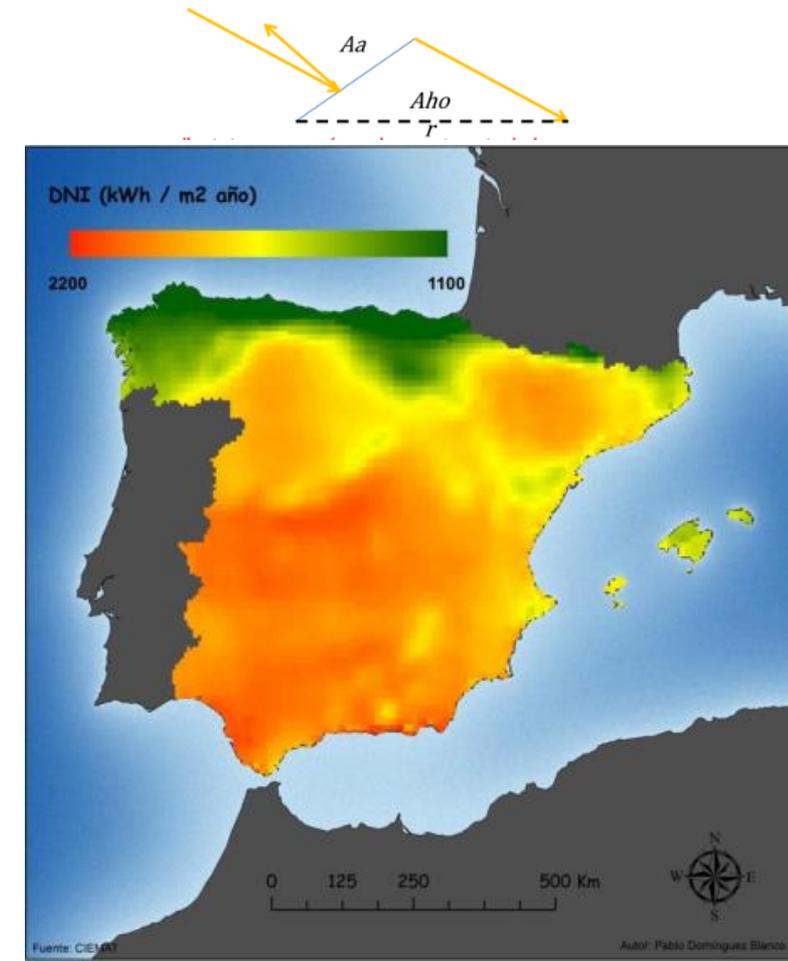
### 8.3.- Centrales eléctricas termosolares. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.3:** Según el [NREL](#), la planta Termosolar de [Puerto Errado 2](#), de 30 MW de potencia neta, con tecnología Fresnel, genera 49 GWh/año, con un recurso solar total de 2.095 kWh/(m<sup>2</sup>año) de  $G_{b,n} = DNI$  y un área total de colectores de 302.000 m<sup>2</sup>. Usa vapor a 270 °C y 55 bar. Calcular su eficiencia eléctrica media.

**Solución:**  $\bar{\eta}_e =$

**Ejercicio 8.4:** Calcular la eficiencia eléctrica de la central [GEMASOLAR](#) y comentar el resultado. Comentar si el uso de la irradiación sobre el plano horizontal a la vez que el área de terreno de los heliostatos es adecuado a este caso.

**Solución:**  $\bar{\eta}_e =$



## 8.4.- Coste de la energía. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.5:** Un proyecto proporciona un  $LCOE$  determinado. Se logra percibir  $k > 1$  veces esa cantidad por la venta energética. Estimar el año  $n_r$  en que se amortiza la instalación y los gastos de O&M de todo el proyecto de  $n$  años, o [periodo de retorno](#) o [payback period](#)  $PB$ , a igual producción renovable cada año.

**Solución:**

**Ejercicio 8.6:** En el proyecto anterior asumir que se percibe  $k' > 1$  veces solamente el coste anualizado del capital inicial  $C_0$  (lógicamente  $k < k'$  [ceteris paribus](#)). Estimar el año en que se amortiza solamente la instalación  $n'_r$ . Es una de las variantes del periodo de retorno del capital, o [payback period](#). P. e. la instalación se para ese año.

**Solución:**

## 8.4.- Coste de la energía. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.7:** Asuma de coste de instalación unitario para la planta termosolar de Puerto Herrado-2 un valor estimativo  $c_0 = 4 \text{ €/W}_e$ , ver [Figura 6.1.0](#), y un coste anual de O&M total estimado del 2% del capital inicial, **incrementándose igual que el interés anual  $i = 6,5\%/año$** . Asuma una potencia y producción del [Ejercicio 8.3](#) . Calcular el coste anualizado de la electricidad  $LCOE$ .

**Solución:**

## 8.4.- Coste de la energía. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.8:** Sea una instalación avanzada fotovoltaica híbrida ([PVT](#)) para la producción simultánea de electricidad y calor solar con el remanente de las células; con orientación fija.

Costes: Adquisición [fotovoltaica](#):  $c_{0,e} = 3 \frac{\text{€}}{W_{e,p}}$ ; térmica:  $c_{0,T} = 0,7 \frac{\text{€}}{W_{T,p}}$  (raro, se suele dar por m<sup>2</sup>).

Operación y mantenimiento, coste fijo anual:  $K_e = \frac{c_{O\&M,e}}{c_{0,e}} = 2\%$ ;  $K_T = \frac{c_{O\&M,t}}{c_{0,t}} = 3\%$

Eficiencias: PV:  $\bar{\eta}_e = 20\%$ ;  $\bar{\eta}_T = 60\%$ , referidos a la misma área de apertura  $A_a$  y a una media anual de  $\bar{G}_T = 200 \text{ W}_s/\text{m}^2$ . **Factores de disponibilidad:**  $FD_e = 90\%$ ;  $FD_T = 80\%$ .

1.- Potencia térmica y potencia total sobre la eléctrica:  $\Upsilon = \frac{\bar{\eta}_T}{\bar{\eta}_e} =$  ;  $\Upsilon_{total} =$

2.- Producción anual de energía por unidad de área:

$$W \left[ \frac{\text{MW}_e \text{ h}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

$$\dot{q} \left[ \frac{\text{MW}_T \text{ h}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

3.- Producción total anual de exergía por unidad de área, si el calor se produce a una temperatura media  $\bar{t} = 60 \text{ °C}$ , con una temperatura ambiente media anual  $t_{amb} = 20 \text{ °C}$ .

$$\dot{a} \left[ \frac{\text{MW h}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

4.- Potencia eléctrica pico **con  $\eta_{e,p} = 0,25$  en condic. estándar**, y pot. media, por unidad de área:

$$W_p \left[ \frac{W_{e,p}}{\text{m}^2} \right] =$$

$$; W' \left[ \frac{W_e}{\text{m}^2} \right] =$$

## 8.4.- Coste de la energía. (cont.) [Volver](#)

**Ejercicio 8.8 (cont.):** Sea una instalación avanzada fotovoltaica híbrida (PVT) para la producción simultánea de electricidad y calor solar con el remanente de las células, de orientación fija.

5.- Costes anualizado, por unidad de área, de la instalación completa con un  $i = 4\%$  de interés anual y una vida financiera de  $n = 20$  años:

$$c_0 \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] =$$

$$FRC \left[ \frac{1}{\text{año}} \right] =$$

$$\dot{c} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

6.- Ingresos anuales por la venta de energía, contando con una prima a la producción de  $p_p = 20 \frac{\text{€}}{\text{MW}_{\text{totalh}}}$  y unos ingresos por la producción:  $p_e = 120 \frac{\text{€}}{\text{MW}_{\text{eh}}}$  y  $p_T = 80 \frac{\text{€}}{\text{MW}_{\text{Th}}}$ :

$$in \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

7.- Flujo de caja anual:

$$fc_f \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] =$$

## 8.5.- Energía solar. Consideraciones adicionales. (*ex cursus*) [Volver](#)

**Ejercicio 8.9:** Un panel fototérmico de  $\eta_e = 15\%$  a  $70\text{ }^\circ\text{C}$  logra aplicar el 75% del sol  $\dot{Q}_S$ , a  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , a una [bomba de calor](#) de alta temperatura a través de un circuito cerrado de agua caliente, véase [Ejercicio 2.9](#). El restante 10% solar queda en forma de pérdidas al ambiente. El calor producido por el panel alimenta el evaporador  $_e$  de la bomba de calor de compresión mecánica que produce agua caliente para calefacción de ambiente interior, cediéndolo a  $80\text{ }^\circ\text{C}$  en su condensador  $_c$ , sin pérdidas apreciables. Es movida por la electricidad fotovoltaica, con un  $COP = \frac{\dot{Q}_c}{W_e} = 6$ . Calcular el rendimiento global y si hace falta calor auxiliar para la bomba, o bien si sobra.

**Solución:**

## 8.7.- Cuestiones de autoevaluación. (cont.) [Volver](#)

8.1	El sistema de plato paraboloide combinado con motor Stirling dispone de almacenamiento intrínseco
8.2	El campo de captadores de canal parabólico es adecuado para alimentar un ciclo <a href="#">Brayton</a>
8.3	Provocar el vacío en el espacio entre la superficie absorbadora y la cubierta en un captador solar térmico logra reducir las pérdidas por radiación
8.4	La solar fotovoltaica disfruta de la baratura y disponibilidad de baterías para el almacenamiento local
8.5	Un panel fotovoltaico de unos 10 a 20 m <sup>2</sup> resultaría adecuado para aproximarse al concepto de vivienda con aporte neto de energía (eléctrica de red en este caso) casi nulo para un hogar urbano de una familia media española domiciliada en el sur.
8.6	El campo de captadores helióstatos y torre central habría de conseguir temperaturas del vapor en un ciclo <a href="#">Rankine</a> como mínimo de 700 °C para que su eficiencia sea aceptable
8.7	El sistema de plato paraboloide de revolución combinado con motor Stirling logra que la temperatura a la que calentar el foco caliente sea moderada en comparación con el ciclo Rankine
8.8	El campo de captadores helióstatos y torre con ciclo <a href="#">Rankine</a> tiene una gran inercia térmica, lo que traslada el grueso de su producción hacia la tarde, ayudado por el almacenamiento
8.9	La superficie selectiva del absorbador en un captador solar logra evitar la absorción de los rayos UV dañinos
8.10	Los canales parabólicos se pueden orientar con su eje este-oeste y siguen la altura del sol
8.11	Los helióstatos de una central termosolar de torre en el hemisferio norte que son más productivos son los situados al norte de la torre
8.12	Las centrales termosolares hibridizadas tienen limitado a un 15% el aporte de quemado de biocombustibles o residuos en España a 2013.

## 8.7.- Cuestiones de autoevaluación. (cont.) [Volver](#)

8.13	Los captadores solares instalados en serie suman el calor recibido al mismo caudal común.
8.14	Los captadores solares instalados en paralelo suman el calor recibido al mismo caudal que se reparte entre ambos.
8.15	Los captadores solares montados en serie logran un aumento de temperatura mayor que si los mismos se montan en paralelo y pasa el mismo caudal por cada uno de ellos.
8.16	En los captadores solares montados en serie se suma la caída de presión de remanso de cada uno de ellos
8.17	En los captadores solares que sean idénticos y estando montados en paralelo se divide el caudal entre ellos.
8.18	Los cambiadores de calor pueden ser adiabáticos con respecto al ambiente, con lo que no existen pérdidas de energía. Pero la caída de temperatura entre la corriente suministradora de calor y la receptora del mismo origina una degradación (irreversibilidad) que destruye exergía.
8.19	El rendimiento eléctrico de las centrales de torre es superior a las de captadores cilindro-parabólicos convencionales.
8.20	El rendimiento eléctrico de las centrales de captadores cilindro-parabólicos es superior a las de captadores Fresnel convencionales.
8.21	Para aumentar la temperatura de estancamiento de un captador conviene aumentar el número de soles S.
8.22	Una superficie selectiva pierde notablemente absorptividad de la radiación solar.
8.23	El factor de recuperación de capital evalúa cuanto capital inicial se recupera cada año.
8.24	El valor actual de un capital realizable en el futuro es mayor que éste.

## 8.8.- Actividades propuestas. [Volver](#)

**Actividad 8.1:** Localice el calor específico medio de la sales hoy en día mayoritariamente usadas para almacenamiento térmico en centrales termosolares. Determine la masa  $m$  en toneladas, necesaria por hora de almacenamiento y por MW de potencia eléctrica de salida. Ofrezca la fuente de sus resultados. Use exclusivamente el espacio ofrecido en esta cara del formulario.

**Solución:**

## 8.8.- Actividades propuestas. [Volver](#)

**Actividad 8.2:** Determine la relación de capacidad de almacenamiento MJ/kg, y si es posible MJ/litro, entre [ultra-condensadores](#) y [super-condensadores](#) actuales, baterías incluyendo de litio-ion y un hidrocarburo líquido común en su *PCI*. Indique la densidad aparente y ser posible, costes. Ofrezca la fuente de sus resultados.

**Solución:**

## 8.8.- Actividades propuestas. [Volver](#)

**Actividad 8.3.-** Estime parámetros básicos de un colector solar térmico de canal parabólico de media-baja temperatura, con la superficie del tubo absorbedor al aire. Asuma valores correspondientes a la radiación propia de la superficie absorbidora como de infrarrojo lejano FIR, distintos de los dados para la radiación solar incidente, por ser la superficie selectiva. Datos a incidencia nula:

Absorbancia solar $\alpha_s$	Emisividad FIR $\epsilon_{FIR}$	Concentración geométrica $C$	Reflejancia espejo $\rho$	Fracción de rayos no perdidos $\gamma$
0,9	0,1	20	0,9	0,95

**Rendimiento óptico:**  $\eta_o =$

**Número de soles medio:**  $S =$

Asumiendo pérdidas según los datos siguientes:

Temperatura ambiente $t_a$ [°C]	Temp. superficial absorbedor $t$ [°C]	Cte. de Stefan-Boltzmann $\sigma$ $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$	Tubo: $h$ $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
0	150	$5,67 \times 10^{-8}$	20

**Potencia de pérdidas radiativas p. u. de área de absorbedor:**

$$\frac{\dot{Q}_r}{A_c} \left[\frac{W}{m^2}\right] =$$

**Potencia de pérdidas convectivas p. u. de área de absorbedor:**  $\frac{\dot{Q}_c}{A_c} \left[\frac{W}{m^2}\right] =$

Irradiancia total incidente $G_T$ $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Irradiancia difusa $G_d$ $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Calor específico aceite caloportador $c$ $\left[\frac{kJ}{kg K}\right]$	Caudal másico $\dot{m}$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$	$F'[-]$
800	100	2	1	0,9

**Rendimiento del colector basado en la directa:**  $\eta_{cap} =$

Aumento de temperatura a través del colector, asumiendo que el colector tiene una superficie de apertura  $A_a = 60 \text{ m}^2$ :

$$\Delta T [K] =$$

## 8.8.- Actividades propuestas. [Volver.](#)

**Actividad 8.4.-** Se entiende por retorno  $n_r$  el tiempo que se tarda en disponer de fondos acumulados para pagar el equipamiento y mantenimiento de una instalación hasta el final del proyecto a base de [cash flow](#). La **cogeneración** puede permitir retornos de la inversión cortos especialmente si se cuenta con ingresos de la venta en su totalidad de electricidad y de los calores residuales del motor y primas. Determine  $n_r$  siguiendo la secuencia propuesta. Considere un plazo inicial de financiación  $n = 10$  años.

Coste unitario de adquisición de todo el sistema:  $c_0 = 2 \text{ €/W}_e$ . Rendimiento eléctrico del motor de gas:  $\eta_e = 0,4$ . Pérdidas de calor y combustible inquemado: 10% del  $PCI$ . Precio del combustible  $p_{co} = 0,5 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$  con  $PCI = 55 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ . Coste de mantenimiento anual creciente con la cifra de interés  $i$ :  $c_{O\&M} = 0,1 \times c_0$ ;  $i = \frac{0,06}{\text{año}}$ . Precios de venta constantes en el tiempo: De la electricidad:  $p_e = 70 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$  y del calor:  $p_T = 30 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ . Prima a la producción total por cogeneración:  $p_{cg} = 10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}_{e+T}}$ . Factor de capacidad  $FC = 0,5$ , bajo por jornada laboral.

**Solución:**  $FRC = \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} =$

Rendimiento energético total:  $\eta_{e+T} =$

Ingreso unitario anual por venta de electricidad,  $t = 1$  año:  $\dot{i}n_e \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Ingreso unitario anual por venta de calor:  $\dot{i}n_T \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Ingreso unitario anual por primas:  $\dot{i}n_p \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Coste anualizado de adquirir y mantener el sistema  $\dot{c}_{0,O\&M} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Coste unitario anual de combustible (a veces se incluyen en costes de operación):  $\dot{c}_c \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Flujo de caja (Ingresos-costes):  $\dot{f}c_f \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}_e \text{ año}} \right] =$

Cociente entre ingresos y costes totales:  $k =$

Tiempo de retorno  $n_{PB} =$  no existe, no se recupera el capital