

# DE LOS ARCHIVOS HISTÓRICOS DE LA ENERGÍA SOLAR

## “La cocina solar”

E. Lorenzo

Instituto de Energía Solar  
Universidad Politécnica de Madrid

*En memoria de Álvaro Altés*

### Introducción

Este trabajo continúa con la serie de ejercicios (ver “Era Solar” 99 y 110) preparados para, por un lado, recuperar la memoria de algunos pioneros de la energía solar, especialmente de los españoles, y, por otro, para servir de apoyo didáctico en la enseñanza de la energía solar en general. El presente ejercicio fue propuesto en el examen de la asignatura Energía Solar, que se imparte como optativa en el primer ciclo de la E.T.S.I. Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (ver [www.ies-def.upm.es](http://www.ies-def.upm.es), para más información)

### Ejercicio

En 1767, el naturalista suizo Horace de Saussure, famoso por ser el impulsor de la primera ascensión al Mont Blanc, hizo fabricar cinco cajas rectangulares de vidrio de Bohemia, todas abiertas por un lado y cada una algo mayor que la anterior. Superponiendo una sobre otra, utilizando una tabla de peral ennegrecido como base, y colocando un termómetro en el interior de la caja más pequeña, construyó un dispositivo al que denominó “heliotermómetro”, que intentaba “atrapar y medir el calor solar”. Armado con tal dispositivo realizó diversos experimentos, y de uno de ellos escribió:

*“[...] he visto que el termómetro alcanzaba 70 grados de Réamur (87,5 °C). Las frutas expuestas a este calor se cuecen y entregan su jugo...”*

Este experimento podría ser considerado como el primer antecedente de la cocina solar.

Bastante más tarde, entre 1834 y 1838, el naturalista inglés Sir John Herschel residió en el cabo de Buena Esperanza, para llevar a cabo un programa de observaciones astronómicas que incluía el estudio de algunos aspectos energéticos de la radiación solar, para lo que construyó un “heliotermómetro” simplificado, constituido por una sola campana de vidrio sobre un fondo de cobre ennegrecido y aislado con arena. En el informe que redactó, describiendo los experimentos con este aparato, se lee:

*“[...] viendo que las temperaturas sobrepasaban el punto de ebullición del agua, nos divertimos haciendo algunas experiencias con huevos, frutas, carne, etc.... que expusimos al Sol de la misma manera, el 21 de diciembre y los días siguientes, y todo esto se coció perfectamente después de un tiempo no muy largo; los huevos estaban duros y su interior desmenuzable. Otra vez preparemos un estofado, bastante fuerte, de carne y legumbres, cuyo exquisito gusto alabaron los comensales...”*

Que sepamos, esta frase constituye el primer antecedente histórico documentado de una comida cocinada al sol.

Posteriormente, Agustín Mouchot, conocedor de ambas experiencias, construyó la primera cocina solar específica, introduciendo una olla de hierro ennegrecido en el interior de una campana de vidrio, y rodeando el conjunto de un espejo cilíndrico. En su libro “La Chaleur Solaire”, publicado en 1869, dice:

*“[...] esta especie de marmita solar [...] me ha permitido, por ejemplo, confeccionar al Sol un excelente cocido, formado por un kilo de carne de ternera y diversas legumbres. Después de cuatro horas de insolación, todo estaba perfectamente cocido, a pesar del paso de algunas nubes que habían tapado el Sol; y el caldo era excelente debido a que el calentamiento en la marmita había sido muy regular...”*

También hay referencias de un restaurante en China que en 1894 servía comida cocinada al sol. Sin embargo, al igual que ocurrió con otras aplicaciones de la energía solar, estas tempranas experiencias no tuvieron continuidad, y hubo que esperar a mediados del siglo XX para asistir al desarrollo de una actividad continuada y con resultados prácticos relevantes, que han puesto la cocina solar al alcance de cualquier interesado.

En España, la cocina solar ha sido una actividad más bien tardía. No es hasta octubre de 1992 (cuando ya se fabricaban paneles térmicos y módulos fotovoltaicos) que se detecta alguna actividad documentada. En esa fecha, la revista “Integral” publicó un artículo de Álvaro Altés titulado “La Cocina Solar”, que, por lo que sabemos, tiene el mérito de haber sido la primera publicación en España que versó sobre las posibilidades de la energía solar para cocinar, y que animó a bastantes a ponerse manos a la obra con esta alternativa.

Preocupado por los problemas que afectan al mundo en su globalidad y, entre ellos, por la pobreza, Álvaro señalaba, en la introducción del artículo, el potencial de las cocinas solares para paliar las dificultades de los países más desfavorecidos:

*“[...] según la FAO (Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas), cerca de 2.500 millones de personas –más del 25 % de la humanidad– que carecen de leña. Si no se encuentran alternativas, 2.400 millones de personas sufrirán este problema en el año 2000 [...] La falta de combustible obliga a la gente a dedicar muchas horas a la búsqueda de leña, o bien sustitutos como estiércol y arbustos verdes. En numerosas poblaciones, las familias destinan hasta el 30 % de sus ingresos en combustible para cocinar...”*

Lamentablemente, Álvaro no se equivocó en tan triste predicción. Y que el uso de cocinas solares no esté tan extendido como a él le hubiera gustado se debe, principalmente, a que la introducción de novedades en un ámbito tan tradicional y, por ello, tan conservador, como la cocina en general es siempre muy lenta. Un ejemplo patente de ello es el “microondas”, presente en la mayoría de nuestras viviendas desde hace ya bastantes años, cuyo uso permanece prácticamente restringido a calentar la leche del desayuno directamente en las tazas (para evitar fregar cacerolas), y sin que se aprecien síntomas de que algún día llegue a utilizarse como un instrumento para cocinar de verdad, posibilidad ésta cuyas ventajas describen con insistencia los folletos comerciales que acompañan a los equipos.

Las cocinas tradicionales representan, en general, un sistema más complejo de lo que parece a primera vista. Además de cocinar, suelen proporcionar otros servicios: luz, humo para conservar carne y preservar la paja de los tejados, calor, lugar de encuentro, etc. Cualquier tecnología que pretenda sustituir a la forma tradicional de cocinar tiene, necesariamente, que entender esta realidad y ofrecer una alternativa también para esos servicios añadidos, lo que no siempre es sencillo. Además, están las dificultades asociadas a todo cambio en las costumbres cotidianas (horarios, etc.). Pero aún así, las cocinas solares son dispositivos energéticos muy atractivos, de técnica tan sencilla como elegante, y en cuyo fomento conviene insistir porque son muchos los beneficios esperables de su uso.

Volviendo al precioso artículo que nos ocupa, Álvaro proponía la construcción de una cocina consistente en:

*“[...] dos cajas de cartón ondulado (si procede de cajas viejas, asegurarse que no contuvieron productos tóxicos) que se colocan una dentro de la otra y miden como mínimo  $56 \times 66 \times 25$  y  $46 \times 56 \times 20$  cm respectivamente. De este modo se deja un espacio entre ellas de 5 cm para poner un aislante, que puede hacerse simplemente con un cartón inclinado y recubierto con papel de aluminio por un lado, o con papel de periódico... La tapa mide, para las medidas anteriores de las cajas,  $61 \times 71 \times 8$  cm y va provista de un vidrio común de ventana, de  $50 \times 60$  cm.”*

Para dar ejemplo, acompañaba el artículo con una foto de una cocina construida por él mismo, con cartón recuperado de las calles de Barcelona (ver figura 1).



Fig. 1. Cocina solar descrita en el artículo de la revista “Integral” de 1992.

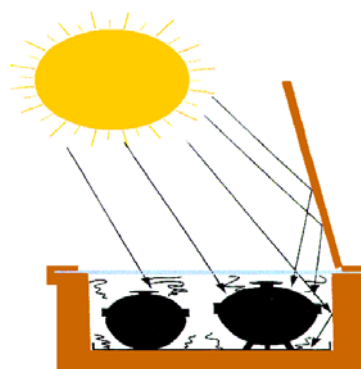


Fig. 2. Principio de funcionamiento de la cocina solar.

A la hora de cocinar, hay que poner los alimentos en el interior de ollas con tapa y de color negro, y éstas, a su vez, en el interior de las cocinas. A la tapa se pega un reflector brillante, también hecho con cartón y papel de aluminio, que junto con los espejos de las paredes hacen que sea mucha la radiación del Sol que incide sobre las ollas. El aislante y el vidrio dificultan la pérdida de calor desde las ollas hacia el ambiente, de lo que resulta una notable elevación de la temperatura en el interior de las mismas, lo que constituye una manifestación (esta vez agradable) del renombrado “efecto invernadero”, permitiendo cocinar con elegancia y facilidad (ver Figura 2). Sobre la forma de cocinar y sobre los límites de su caja, dice Álvaro:

*“Es necesario casi el doble de tiempo para cocinar, pero la comida no se quema ni se pega a las ollas, y no hay que removerla mientras se cocina. Puede abandonarse durante horas o por todo el día, y la comida se cocerá y quedará deliciosa hasta que se consuma. [...] La caja puede usarse en los días de sol y aun en los parcialmente soleados, pero no cocina bien cuando las sombras no se distinguen claramente recortadas –ya sea porque el día esté muy nublado o porque haya mucho polvo–, o cuando la sombra propia sea más larga que la altura de la persona que la produce –como ocurre en invierno, temprano por la mañana o avanzada la tarde. Por tanto, la cocina convencional sigue siendo útil para cocinar los días nublados o por la noche.”*

Esta frase, particularmente acertada y preciosa en su sencillez, además de describir las condiciones de la radiación solar que permiten cocinar, pone de manifiesto la conveniencia de combinar diferentes fuentes de energía.

Álvaro Altés, de quien dicen los que le conocieron que, además de pionero y soñador, era serio en el trabajo como pocos, lo que se aprecia en el cuidado texto de sus artículos, murió en la primavera de 2002. Este ejercicio pretende rendir un pequeño homenaje a su memoria.

Intentaremos, primero, estimar la energía que puede captar la caja a lo largo de un día claro de un equinoccio en Madrid, cuya latitud es  $\phi = 40,5^\circ$ . Supondremos que el día es claro, que la caja está siempre orientada al Sur, que el ángulo que forma el reflector se ajusta para que el área total de captación sea precisamente de  $1 \text{ m}^2$ , y que al mediodía resulta perpendicular a los rayos solares. También supondremos que el perfil diario de la irradiancia incidente sobre ese área,  $G(t)$ , responde a una función coseno con el máximo al mediodía y que se anula al amanecer y al atardecer, como muestra la figura 3.

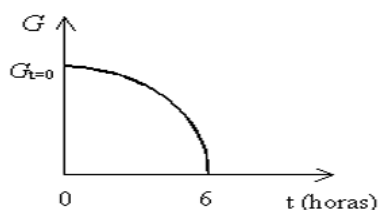


Fig. 3. Perfil diario de irradiancia incidente del día claro considerado

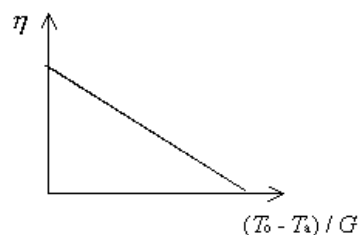


Fig. 4. Eficiencia instantánea de funcionamiento de la cocina solar

En estas condiciones, se pide:

- a) Determinar el ángulo de inclinación del área de captación sobre la horizontal,  $\beta$ , la irradiancia incidente al mediodía,  $G_{t=0}$ , y la irradiación total incidente a lo largo del día,  $G_d(\beta)$ .

En general, la pérdida de calor desde una olla hacia el ambiente depende de la diferencia de temperatura entre ambos,  $T_o - T_a$ . De esto se derivan dos consecuencias relevantes:

- Que la eficiencia de la cocina solar disminuye conforme aumenta dicha diferencia de temperaturas.
- Que, para una diferencia determinada, existe un umbral crítico de irradiancia incidente que compensa precisamente la pérdida de calor. Sólo con irradiancias superiores a este umbral el balance energético de la cocina es positivo (la radiación solar que absorbe es mayor que el calor que pierde).

Estas características se representan bastante bien asimilando la eficiencia de la cocina,  $\eta_c$ , a una recta de pendiente negativa en el eje de abscisas, y utilizando para éste la variable  $(T_o - T_a) / G$ , como se describe en la figura 4, es decir,  $\eta_c = a - b (T_o - T_a) / G$ . No está de más saber que esta expresión es la misma que se utiliza para describir el comportamiento de los paneles solares térmicos en general. Supondremos que un experimento cuya descripción no cabe aquí, permite concluir que los coeficientes correspondientes a la caja de Álvaro son  $a = 0,6$  y  $b = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Entonces, se pide:

- b) ¿Cuál es el nivel de irradiancia crítica,  $G_{\text{crit}}$ , para una temperatura de la olla de  $85^\circ\text{C}$ , suficiente para cocinar muchos platos, cuando la temperatura ambiente es de  $25^\circ\text{C}$ ? Y, en estas condiciones, ¿cuánto tiempo,  $T_{\text{ef}}$ , es efectiva la caja de Álvaro en el día de referencia?, es decir, ¿durante cuantas horas la irradiancia incidente en la caja está por encima de ese nivel umbral?

La energía térmica, o cantidad de calor, necesaria para cocinar depende de la cantidad de alimento y de la receta que rija su preparación (por ejemplo, hacer un guiso requiere más tiempo de fuego que cocer pasta), y es muy variable de unos casos a otros. En este ejercicio consideraremos un plato de referencia cuyo comportamiento térmico supondremos igual al del agua, y que exige para su cocción una cantidad de calor equivalente a la necesaria para, primero, elevar su temperatura de 20 °C a 85 °C y, después, para evaporar un cuarto de su volumen (en contra de una creencia muy extendida, para evaporar agua no es preciso que hierva primero). Con estos datos, se pide:

c) *¿Cuánta energía térmica por kilo de alimento final,  $E_{T1}$ , es necesaria para cocinar este plato?*

Como ya vimos, la eficiencia instantánea de una cocina solar depende de la irradiancia incidente que, a su vez, varía a lo largo del día. Por eso, calcular con precisión la cantidad de ese plato que puede cocinarse al día es un ejercicio seguramente complicado. Y como quiera que ni el día de referencia ni el plato son demasiado representativos de la realidad (esto suele ocurrir con la mayoría de los modelos), el esfuerzo de resolver tal complejidad está poco justificado. Así que intentaremos una estimación de las capacidades culinarias de la caja de Álvaro, asumiendo, primero, que colecta energía sólo durante el tiempo efectivo calculado en el apartado b, segundo, que la irradiación colectada durante ese período es equivalente a la que se colectaría durante el mismo tiempo y con una irradiancia constante,  $G_{cte} = 0,85 G_{t=0}$  (este supuesto es coherente con el perfil coseno supuesto en el apartado a) y, tercero, que la eficiencia de la cocina durante ese tiempo es igual a la que correspondería a esta última condición de operación. En estos supuestos, se pide:

d) *¿Cuánto alimento final, en peso, podría cocinar la caja de Álvaro en el día de referencia, suponiendo una temperatura ambiente constante e igual a 25 °C?*

Al propio beneficio de cocinar, el hacerlo con cocinas solares añade el de evitar las emisiones, nocivas para el medio ambiente, que se producirían en el caso de cocinar con gas o con electricidad. Estimaremos aquí las emisiones evitadas en este último caso, suponiendo que una cocina eléctrica transmite calor a la olla con una eficiencia (térmica/eléctrica) típica del 80 %, que el 40 % de la electricidad consumida en España proviene de la quema de carbón, y que este proceso de generación eléctrica se realiza con una eficiencia global del 30 %. Entonces, se pide:

e) *¿Qué cantidad de  $CO_2$  evita la caja de Álvaro en el caso (día y plato) de referencia?*

Cocinar con electricidad es, en términos termodinámicos, poco sensato, ya que supone utilizar una energía de alta calidad (la electricidad es muy ordenada) para una aplicación que no lo requiere (el calor a baja temperatura es muy desordenado). Por ello, considerar el recurso a la tecnología eólica o fotovoltaica para cocinar es poco recomendable. No obstante, y tomando en consideración que un ejercicio de examen se puede permitir la licencia de “hacer la vista gorda” respecto a algunas reglas de buen comportamiento en la ingeniería, aprovecharemos aquí la ocasión para revisar algunos conceptos relativos a esas tecnologías. Para ello, analizaremos la cocción de nuestro plato de referencia en una cocina eléctrica como la considerada en el apartado anterior. Entonces, se pide:

f) *¿Cuál sería la potencia nominal del generador fotovoltaico,  $P_M^*$ , capaz de proporcionar la electricidad necesaria para cocinar, a lo largo de todo el día de referencia, en el supuesto de que el factor de rendimiento respecto a las condiciones estándar sea  $FR = 0,4$ ?*

NOTA EXPLICATIVA: Los módulos fotovoltaicos aprovechan toda la irradiancia que incide sobre ellos, incluso la que está por debajo del nivel crítico calculado en el apartado b. El  $FR$  considera las pérdidas por temperatura, reflexión, almacenamiento en batería y acondicionamiento de potencia.

Un asterisco como superíndice de un símbolo significa que el valor de la magnitud que representa dicho símbolo está referido a las Condiciones Estándares de Medida.

g) ¿Cuál sería el radio,  $R$ , de un generador eólico capaz de proporcionar la electricidad necesaria para cocinar, a lo largo de 5 horas de viento moderado, con velocidad de 7 m/s, en el supuesto de que el coeficiente de pala fuese  $C_p = 0,3$ , y que la eficiencia de conversión (eléctrica/mecánica) del alternador fuese  $\eta_{EM} = 0,7$ ?

NOTA. Valores por defecto, para utilizar en el caso de no resolver algún apartado:

*Irradiancia al mediodía:*  $G_{t=0} = 900 \text{ W/m}^2$

*Irradiación diaria:*  $G_d(\beta) = 7 \text{ kWh/m}^2$

*Tiempo efectivo:*  $T_{ef} = 7 \text{ h}$

**Solución:**

- a) Determinar el ángulo de inclinación del área de captación sobre la horizontal,  $\beta$ , la irradiancia incidente al mediodía,  $G_{t=0}$ , y la irradiación total incidente a lo largo del día,  $G_d(\beta)$ .

*En el equinoccio la declinación es nula, y el ángulo de inclinación de una superficie que al mediodía es perpendicular al Sol es igual a la distancia cenital y, a su vez, a la latitud del lugar.*

*Al mediodía, la masa de aire es:*

$$AM = 1/\cos \phi = 1,315$$

*Y la irradiancia se estima como:*

$$G_{t=0} = 1367 \text{ W/m}^2 \times 0,7^{AM^{0,678}} = 889,7 \text{ W/m}^2$$

*Por otro lado, con el origen de tiempos al mediodía, expresando el tiempo en horas y los ángulos en radianes,  $G(t) = G_{t=0} \cos(t\pi/12)$ , de donde la irradiación diaria es:*

$$G_d(\beta) = 2 \int_0^6 G(t) dt = G_{t=0} \times 24 \text{ h}/\pi = 6797 \text{ Wh/m}^2$$

- b) ¿Cuál es el nivel de irradiancia crítica,  $G_{\text{crit}}$ , para una temperatura de la olla de 85 °C, suficiente para cocinar muchos platos, cuando la temperatura ambiente es de 25 °C? Y, en estas condiciones, ¿cuánto tiempo,  $T_{\text{ef}}$ , es efectiva la caja de Álvaro en el día de referencia?, es decir, ¿durante cuantas horas la irradiancia incidente en la caja está por encima de ese nivel umbral?

*Justo en la condición de irradiancia crítica, la eficiencia es nula, por lo que:*

$$0,6 = 5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{C)} \times (85 - 25) \text{ }^\circ\text{C} / G_{\text{crit}} \Rightarrow G_{\text{crit}} = 500 \text{ W/m}^2$$

*Este valor se alcanza en el instante dado por:*

$$t_{\text{crit}} = (12/\pi) \text{ arc cos}(500/889,7) = 3,72 \text{ h}$$

*de donde:*

$$T_{\text{ef}} = 2 t_{\text{crit}} = 7,44 \text{ h}$$

- c) ¿Cuánta energía térmica por kilo de alimento final,  $E_{T1}$ , es necesaria para cocinar este plato?

*Utilizando los subíndices “F”, “I” y “E” para indicar “final”, “inicial” y “evaporada”, respectivamente, las masas son:*

$$M_I = (4/3)M_F; M_E = (1/3)M_F$$

*La energía térmica para obtener una  $M_F$  es:*

$$E_T = (4/3)M_F \times 1 \text{ kcal/(kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C)} \times 65 \text{ }^\circ\text{C} + (1/3)M_F \times 540 \text{ kcal/kg} = 266,7 \text{ (kcal/kg)} M_F$$

*o, lo que es lo mismo:*

$$E_{T1} = 266,7 \text{ kcal/kg} = 1116,3 \text{ kJ/kg}$$

- d) ¿Cuánto alimento final, en peso, podría cocinar la caja de Álvaro en el día de referencia, suponiendo una temperatura ambiente constante e igual a 25 °C?

*La irradiación y la eficiencia efectivas, respectivamente son:*

$$G_{\text{def}} = 889,7 \text{ W/m}^2 \times 0,85 \times 7,44 \text{ h} = 5626 \text{ Wh/m}^2$$

$$\eta_{\text{ef}} = 0,6 - 5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)} \times 60 \text{ °C} / (889,7 \text{ W/m}^2 \times 0,85) = 0,2$$

*El calor transferido a la comida, y el alimento cocinado, son:*

$$E_{\text{T}} = G_{\text{def}} \eta_{\text{ef}} \times 1 \text{ m}^2 = 1125,2 \text{ Wh} = 4050,7 \text{ kJ}$$

$$M_{\text{F}} = E_{\text{T}} / E_{\text{T1}} = 3,63 \text{ kg}$$

- e) ¿Qué cantidad de CO<sub>2</sub> evita la caja de Álvaro en el caso (día y plato) de referencia?

*La energía térmica que debería proporcionar la combustión del carbón es:*

$$E_{\text{TC}} = (E_{\text{T}} / 0,8) \times (0,4 / 0,3) = 6751,2 \text{ kJ}$$

*que, a razón de 3,66g de CO<sub>2</sub> por cada 33 kJ, supondrían la emisión de 0,750 kg de CO<sub>2</sub>.*

- f) ¿Cuál sería la potencia nominal del generador fotovoltaico,  $P_{\text{M}}^*$ , capaz de proporcionar la electricidad necesaria para cocinar, a lo largo de todo el día de referencia, en el supuesto de que el factor de rendimiento respecto a las condiciones estándar sea  $FR = 0,4$ ?

*La energía eléctrica para la cocina es:*

$$E_{\text{E}} = E_{\text{T}} / 0,8 = 1406,5 \text{ Wh} = 5063,4 \text{ kJ}$$

*de donde:* 
$$P^* = G^* [E_{\text{E}} / G_{\text{d}}(\beta)] (1/FR) = 517 \text{ W}$$

- g) ¿Cuál sería el radio,  $R$ , de un generador eólico capaz de proporcionar la electricidad necesaria para cocinar, a lo largo de 5 horas de viento moderado, con velocidad de 7 m/s, supuesto que el coeficiente de pala fuese  $C_{\text{p}} = 0,3$ , y que la eficiencia de conversión (eléctrica/ mecánica) del alternador fuese  $\eta_{\text{EM}} = 0,7$ ?

*$E_{\text{E}}$  debe ser igual a la energía eléctrica proporcionada por el alternador:*

$$E_{\text{E}} = \eta_{\text{EM}} (1/2) \rho_{\text{aire}} \pi R^2 T v^3 C_{\text{p}}$$

*de donde:*

$$R^2 = [2 \times 5063,4 \times 10^3 \text{ J (kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2) (1/\text{J})] / (1,225 \text{ kg/m}^3 \times \pi \times 5 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \times 7^3 \text{ m}^3/\text{s}^3 \times 0,3 \times 0,7) =$$

$$= 2,03 \text{ m}^2 \Rightarrow R = 1,42 \text{ m}$$

## **Agradecimiento**

Manolo Vilchez y Jordi Miralles, ligados ambos a la Fundación TERRA, me han proporcionado el artículo de “Integral”, y me han hablado con especial cariño de Álvaro Altés.