

Revista Electrónica Nova Scientia

Modelo térmico para estimar la potencia de
cocción estándar de cocinas solares
Thermal model to estimate the standardized
cooking power of solar cookers

M. González-Avilés¹ y H. Servín Campuzano¹

¹Programa de Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural Indígena de
Michoacán, Pátzcuaro, Michoacán

México

M. González-Avilés. E-mail: gamauricio@gmail.com

Resumen

Se presenta el estudio de algunos aspectos de la física térmica necesarios para el desarrollo de cocinas solares de pequeñas dimensiones, mediante el desarrollo de un modelo térmico semi-empírico computacional. Los parámetros libres del modelo se ajustan con datos obtenidos de un diseño experimental, que consiste en calentamiento de un fluido, exponiendo las cocinas a la radiación que produce un arreglo de lámparas incandescentes para simular la radiación solar. El modelo permite estimar algunos parámetros que sirven para comparar el funcionamiento de cocinas solares, desde el punto de vista térmico, con parámetros establecidos en protocolos estándares de prueba a nivel internacional, como por ejemplo: la potencia de cocción estandarizada y el rendimiento térmico. Utilizando el modelo no se requiere de la medición directa de radiación solar incidente y tampoco depender de las condiciones meteorológicas como días nublados o con mucho viento.

Palabras clave: modelo semi-empírico, rendimiento térmico, estudio comparativo

Recepción: 16-07-2013
2014

Aceptación: 06-08-

Abstract

Paper presents of some aspects of thermal physics necessary for the development of small-scale solar cookers by developing a computational semi-empirical thermal model. The free parameters of the models are adjusted with data obtained from an experimental design, which consists of heating a fluid, exposing the cooker to radiation that produces an array of incandescent lamps to simulate solar radiation. The model is useful it allows for estimate some parameters used to compare the performance of solar cookers, from the thermal point of view, with parameters established testing protocols, standards internationally, such as: standardized cooking power and thermal efficiency. Using the model does not require the direct measurement of incident solar radiation and not dependent on the weather conditions (cloudy days and wind).

Keywords: Semi-empirical model, thermal efficiency, comparative study

Introducción

En México, la investigación sistemática de la energía solar se inició en 1911 con investigadores a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), quienes inspiraron un segundo periodo de investigación entre 1923 y 1928. Algunos años después, como parte de la celebración del año de la Geofísica, en junio de 1957, el Instituto de Geofísica (IGF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) comenzó a medir la radiación solar con cinco estaciones solares localizadas en los siguientes lugares: San Cristóbal de las Casas (volcán Iztacihuatl), Chiapas, Veracruz y Chihuahua (Rincón, 2008).

Las primeras aplicaciones de las estufas solares en México se remontan a 1955, cuando la Universidad de Wisconsin, donó 20 estufas solares tipo sombrilla invertida con superficie aluminizada, a varios estados del país en áreas rurales, intentando resolver tecnológicamente el problema del elevado consumo de leña. Más reciente, en 1995 las estufas desarrolladas por investigadores mexicanos, se han centrado más en las estufas tipo caja, las cuales consisten en cámaras térmicamente aisladas, con espejos en su interior.

En la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) diseñaron un prototipo de horno solar que consiste en una estructura doble de madera aislada térmicamente con roca mineral, sus paredes interiores son de lámina de aluminio, la cubierta doble de vidrio y el reflector doble de madera está forrado con lámina de acero inoxidable. Pruebas a este diseño, en la ciudad de México, indican que se pueden cocinar distintos tipos de alimentos en periodos de 1.5 a 3 horas.

Por otra parte, en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) se desarrollaron estufas y comales solares que emplean la llamada “óptica de no enfoque”, al utilizar concentradores del tipo CPC (Concentrador Parabólico Compuesto), este diseño es denominado “Tolokatsin” (Rincón, 1999). También en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) se diseñó y construyó una estufa solar tipo caja con reflectores interiores, estimando un rendimiento térmico del 22% (Murillo, 2002).

Retomando el ámbito académico, cabe mencionar que recientemente, en el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, ahora Instituto de Energías Renovables (IER), se

han desarrollado dos dispositivos de cocción solar denominados: “cocedor solar de alimentos con respaldo eléctrico” y “horno solar tipo caja optimizado” (Jaramillo, 2009).

Actualmente el uso de estufas solares a nivel mundial ha ido creciendo poco a poco durante los últimos años, los medios de comunicación masiva e Internet han difundido estas tecnologías, por lo que, cada vez es más común su uso en países de tercer mundo, en Asia y Latinoamérica. Existen diversos modelos de cocinas solares, de forma muy general se pueden clasificar en dos: la tipo caja y las de concentración. En este artículo se consideran únicamente las estufas solares de concentración, las cuales se conforman por tres partes principales: el colector, el recipiente absorbedor y una base que sostiene el colector y sirve para transportarla y orientarla. Para una revisión más detallada, sobre cocinas solares, ver por ejemplo (González-Avilés, López & Servín, 2014).

En el desarrollo sistemático de cocinas solares, se necesitan aplicar protocolos de prueba internacionales donde se requiere del uso de cierto instrumental científico especializado, que generalmente es de costo alto, es difícil su adquisición, sobre todo el instrumental para medir la radiación solar (piranómetro) y además, de que, bajo ciertas condiciones meteorológicas, días nublados o con presencia de vientos fuertes, pueden invalidarse. Por lo cual, en el presente trabajo se propone una alternativa, estudiando la física térmica de cocinas solares y considerando condiciones controladas, lo que facilita la construcción de modelos computacionales, utilizando algunos parámetros experimentalmente en laboratorio, que impliquen la estimación de las variables requeridas en los protocolos de prueba, sin requerir la medición directa de la radiación.

El modelo térmico computacional semi-empírico que se propone, comienza con la experimentación en laboratorio, con dos cocinas solares, la Jorhejpatarnskua (González-Avilés, Servín, López, González y Pérez, 2012a) y la estufa solar rural (González-Avilés, Servín, López, y Rodríguez, 2013b), las dos son de concentración a base de un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de Revolución y con un recipiente absorbedor recubierto por una película selectiva de color negro (hollín de madera).

En las pruebas experimentales se utilizaron diferentes tipos de recipientes absorbedores: olla de aluminio a presión y olla de barro con tapa normal. Para obtener los parámetros térmicos necesarios elaborar el modelo y poder aplicar los protocolos de prueba internacionales, se monto

un diseño experimental con lámparas incandescentes para simular la radiación solar, es similar a los que consideran (Passamai, Passamai, Pareja, y Pizarro, 2007; González-Avilés, Servín, López y Pérez, 2012b), en los cuales, solo es necesario medir de manera directa la temperatura del fluido (agua que se vierte en el recipiente absorbedor que es donde se cocinan los alimentos) y la temperatura ambiente.

Para el desarrollo del modelo se ha usado un diseño experimental que consiste en simular la radiación solar con un arreglo de lámparas incandescentes, similar a los que consideran (Passamai, et. al, 2007) y (González-Avilés, et. al, 2012b), en los cuales solo es necesario medir de manera directa la temperatura del fluido (agua) y la temperatura ambiente. Se han corrigiendo algunas inconsistencias encontradas: en (Passamai, et. al, 2007) las inconsistencias que se encontraron fueron que para calcular el coeficiente de energía total disipada, se obtienen valores diferentes para un mismo conjunto de parámetros de ajuste. En (González-Avilés, et. al, 2012b) se pretende estimar adicionalmente los factores de mérito de la cocina solar con una ecuación adicional para el recipiente de la cocina sin carga, obteniendo inconsistencias en el cálculo de la radiación incidente.

Descripción de la metodología, para la construcción del modelo.

Descripción del modelo semi-empírico.

Considérese el caso de una cocina solar de concentración en operación, con radiación constante incidiendo en ella y con carga de fluido (agua) en su olla contenedora. Se plantea un modelo de transferencia de calor, que consiste en considerar el balance de energía para el fluido, en términos de una ecuación diferencial ordinaria con tres parámetros libres.

La ecuación de balance de energía para el fluido en el recipiente de la cocina solar, se expresa como:

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = F' [A_a I - U_l A_a (T_w - T_{amb})] \quad (1)$$

Donde:

A_a = Área del recipiente absorbedor.

I = Radiación total sobre el recipiente absorbedor.

U_l = Coeficiente de energía disipada por unidad de área.

m_w = Masa de agua en el absorbedor.

c_w = Calor específico del agua.

T_w = Temperatura promedio del agua.

T_{amb} = Temperatura ambiente.

F' = Factor de rendimiento de intercambio de calor.

La solución de la ecuación (1) es:

$$T_w = T_{amb} + \frac{I}{U_l} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right). \quad (2)$$

El conjunto de parámetros libres considerados y que se obtienen por medio del ajuste de mínimos cuadrados, son: la radiación incidente sobre el recipiente absorbedor (I), el coeficiente de energía disipada por unidad de área (U_l) y un parámetro con dimensiones de tiempo (τ_2). Con estos parámetros libres, es posible calcular la potencia de cocción estándar y el rendimiento térmico, que son los parámetros de comparación en los protocolos internacionales de prueba para cocinas solares.

Para obtener la radiación total sobre el recipiente absorbedor, se suma la irradiancia sobre el absorbedor, más la reflejada por el concentrador, es decir:

$$I = A_a I_D + A_c \eta_0 I_D. \quad (3)$$

En la expresión (3), A_c es el área del colector solar, I_D es la irradiancia incidente y η_0 es el rendimiento óptico de colector solar (CPC). El rendimiento óptico (Senthilkumar, Perumal, & Srinivasan, 2009) se expresa como:

$$\eta_0 = \alpha \cdot \rho^n. \quad (4)$$

En la ecuación (4), α es la absortancia de la película selectiva del recipiente absorbedor, ρ es la reflectancia de las láminas reflectoras del concentrador (CPC) y n es el número de reflexiones promedio de la radiación en el CPC, antes de incidir en el recipiente absorbedor.

El factor de intercambio de calor entre la olla y el fluido, puede escribirse en términos de los parámetros de ajuste, mediante la siguiente expresión:

$$F' = \frac{m_w c_w}{U_l A_c \tau_2} \quad (5)$$

La potencia de cocción P_c se define como: el producto de la masa de agua m_w por el coeficiente del calor específico del agua c_w por el cambio de temperatura del agua en un determinado tiempo

$\frac{dT_w}{dt}$. La potencia de cocción se calcula, usando el segundo término de la ecuación (1), sustituyendo los datos obtenidos de las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación del balance de energía, por lo tanto la expresión es la siguiente:

$$P_c = m_w c_w \frac{dT_w}{dt} \quad (6)$$

Para los protocolos de prueba se necesita calcular la potencia de cocción estándar, que es el parámetro de comparación (ASAE, 2003) y se obtiene cuando la diferencia de temperatura entre el fluido y el ambiente alcanza los 50° C. La expresión para calcular la potencia estándar es:

$$P_{cest} = P_c (\Delta T = 50^\circ C) \left(\frac{700 W}{I_D} \right) \quad (7)$$

El rendimiento térmico se calcula usando la expresión (8) ver por ejemplo (Kundapur & Sudhir, 2009: 276), que se reduce a la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{m_w C_p (T_{w2} - T_{w1})}{A \int I d\tau} \quad (8)$$

Descripción del diseño experimental

El diseño experimental consiste en realizar pruebas a la cocina solar en laboratorio, el objetivo de estas, es hacer incidir la radiación que produce un arreglo con 3 lámparas incandescentes de 400

Watts y 2 de 1000 Watts sobre la cocina. Las lámparas fueron colocadas a una altura de 20 cm por encima de la cocina. Se registraron de manera manual las siguientes variables a intervalos de 5 minutos: la temperatura del agua en el recipiente absorbedor con un sensor de temperatura tipo K, la temperatura ambiente y la humedad relativa con sensores ambientales (ver esquema de la Figura 1). Las pruebas fueron realizadas a dos cocinas, variando diferentes tipos de ollas concentradoras u recipiente absorbedor (González-Avilés, et. al, 2012a; González-Avilés, Servín, López y Rodríguez Morales, 2013a).

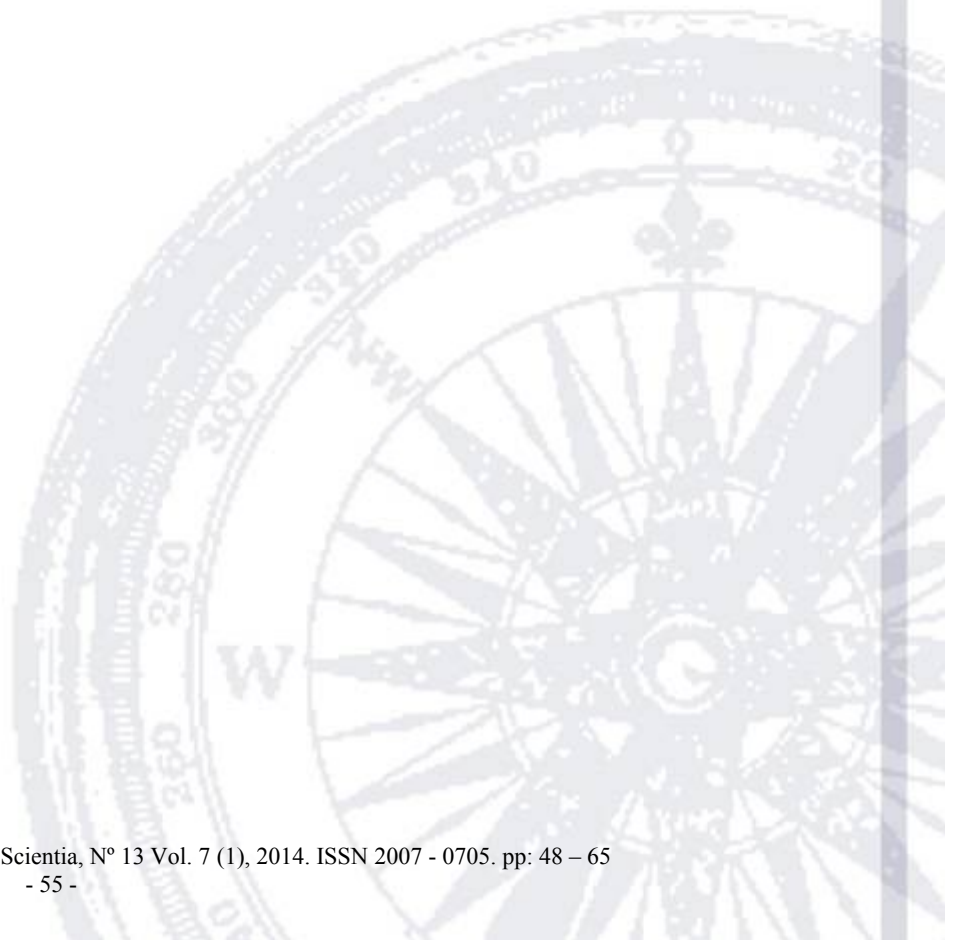
Las cocinas solares que se utilizaron en estas pruebas son:

1. Cocina solar Jorhejpatarnskua (CJ).

A la CJ se le realizaron las pruebas con recipiente absorbedor de aluminio a presión (CJ₁) y con un recipiente de barro (CJ₂).

2. Cocina solar rural (CSR).

Se le hicieron las pruebas con recipiente absorbedor de aluminio a presión (CSR₁).



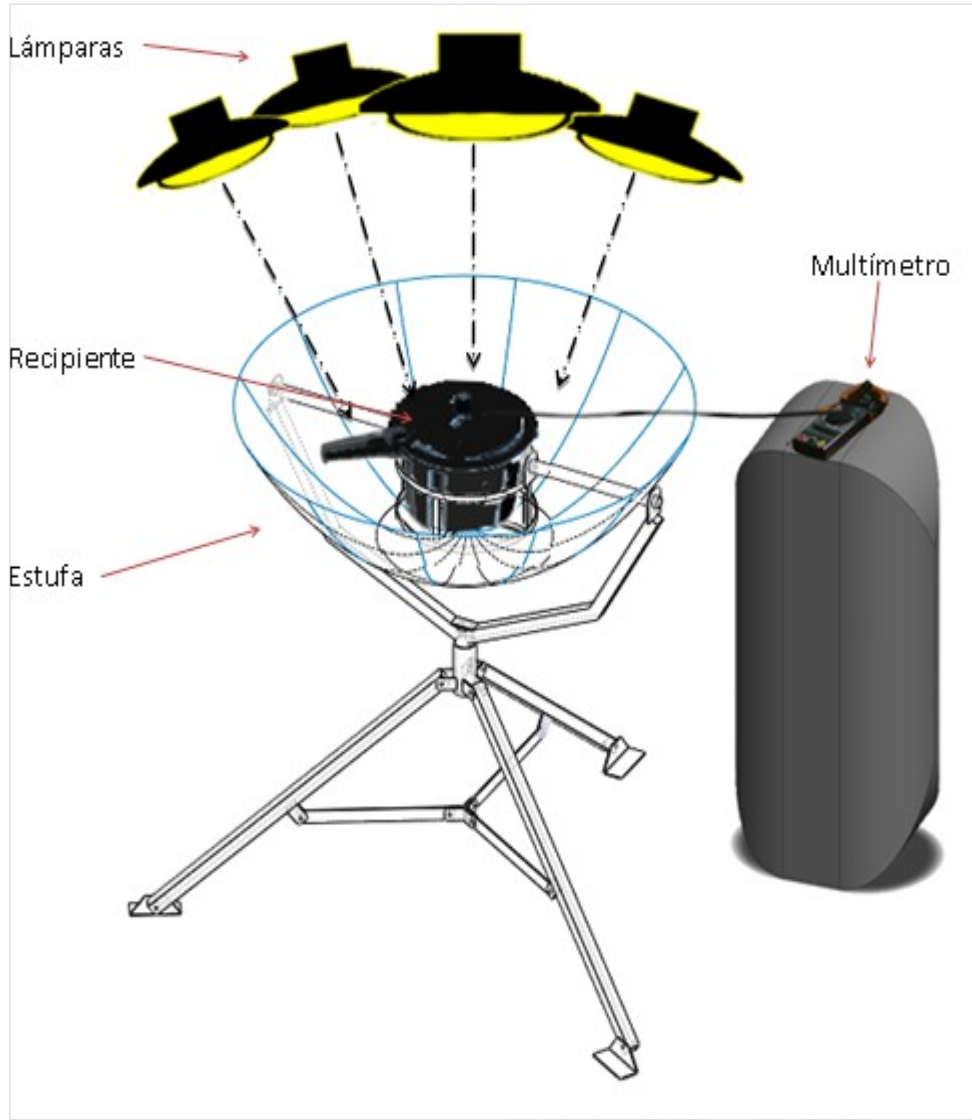
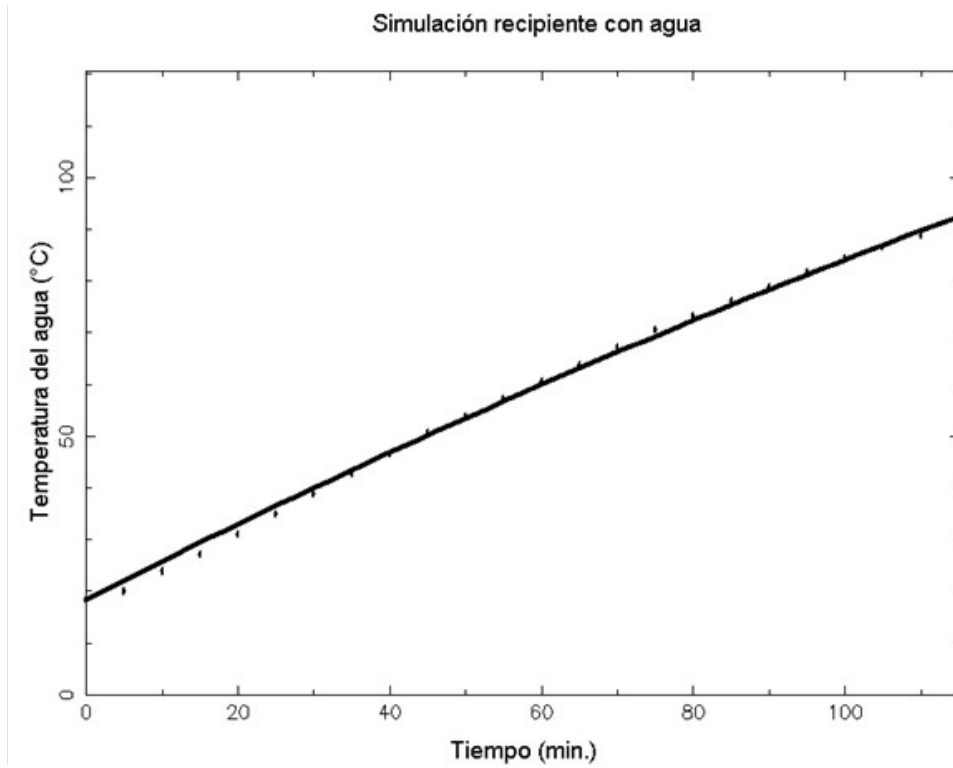


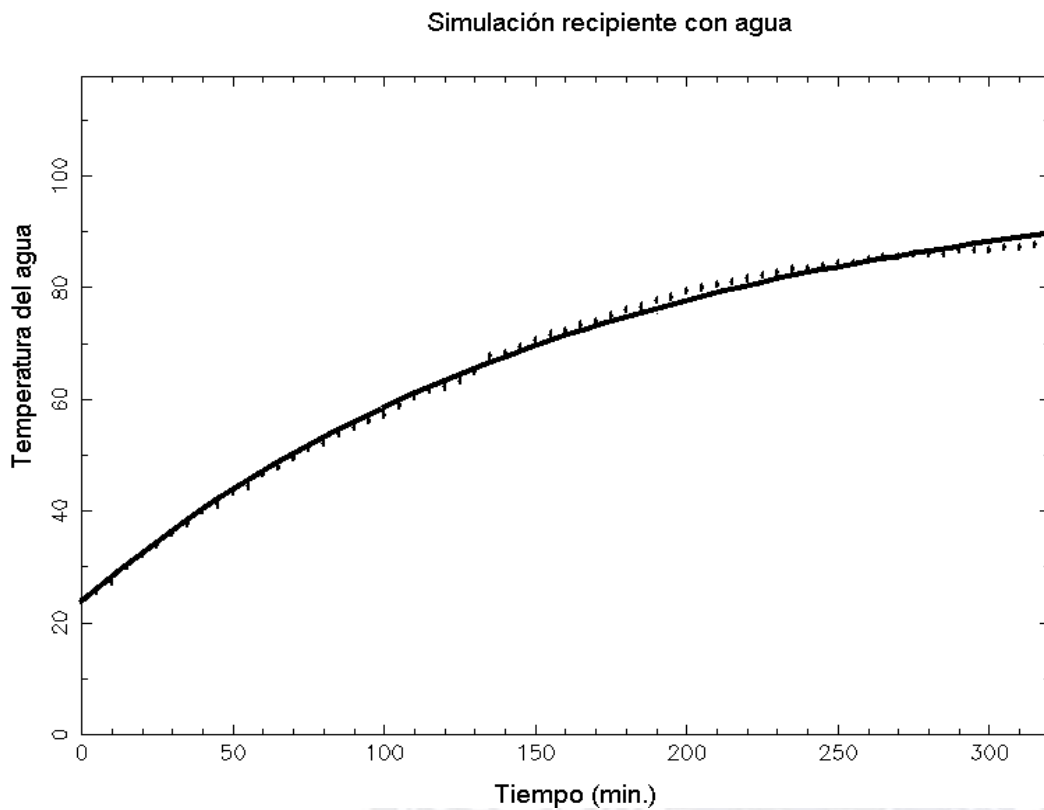
Figura 1. Esquema del diseño experimental.

Resultados

Se realizó el ajuste de la curva del modelo térmico a los datos experimentales de la temperatura promedio del agua, usando la técnica de mínimos cuadrados (ver por ejemplo, Burden & Faires, 2009, 395). Para probar el modelo, se consideraron los datos experimentales de cada uno de los casos: la cocina solar Jorhejpatarnskua CJ (González-Avilés, et. al, 2013a) con dos diferentes ollas contenedoras, olla de presión de aluminio (CJ_1) y olla de barro (CJ_2); la cocina CSR (González-Avilés, et al, 2013b) con olla de presión de aluminio (CSR_1). A continuación se muestran las gráficas con los mejores ajustes para la temperatura del agua en cada uno de los casos considerados.

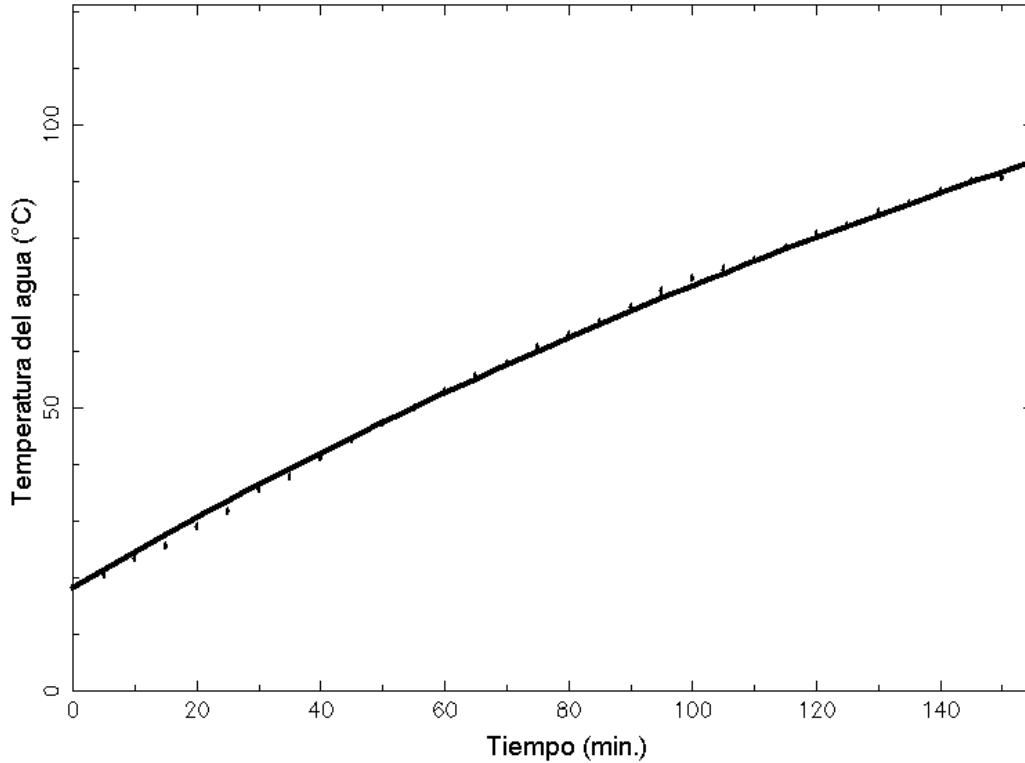


Gráfica 1. Ajuste para calcular la tendencia de la temperatura del agua con la estufa CJ1



Gráfica 2. Ajuste para calcular la tendencia de la temperatura del agua con la estufa CJ2

Simulación recipiente con agua



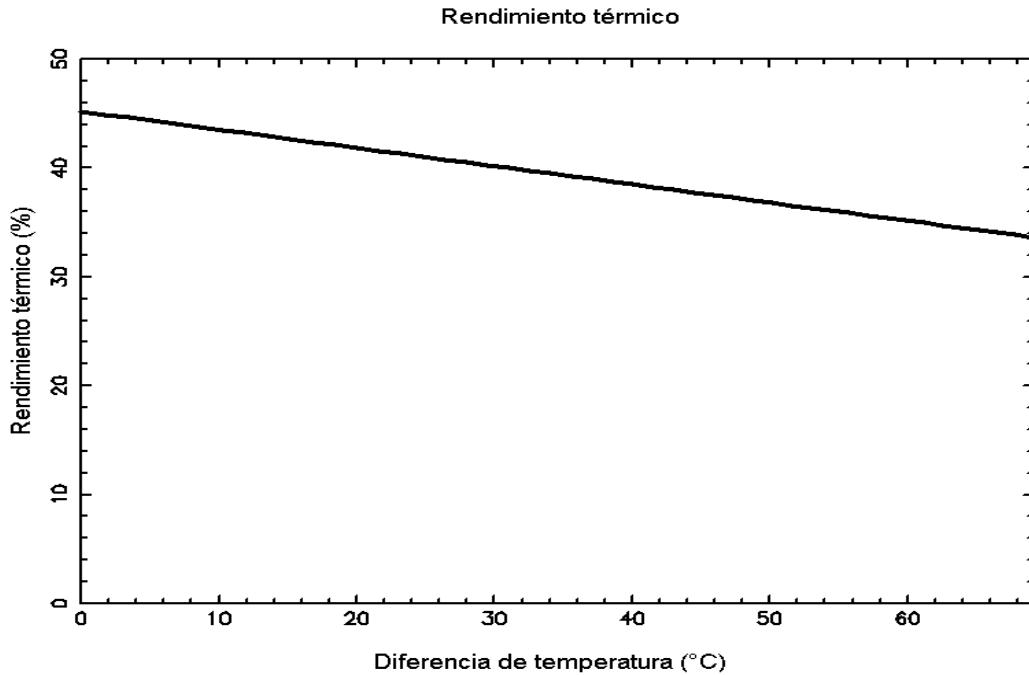
Gráfica 3. Ajuste para calcular la tendencia de la temperatura del agua con la estufa CSR

Como se puede observar en las gráficas, los ajustes que se realizaron a las temperaturas del agua dentro del recipiente contenedor son muy cercanos a los datos obtenidos experimentalmente. En la tabla (1) se muestran los resultados de los parámetros de ajuste y el error relativo de la aproximación de mínimos cuadrados, correspondiente en cada uno de los casos experimentales; parámetro libre con dimensiones de tiempo (τ), coeficiente de energía disipada por unidad de área (U_l) y radiación total sobre el recipiente absorbedor (I).

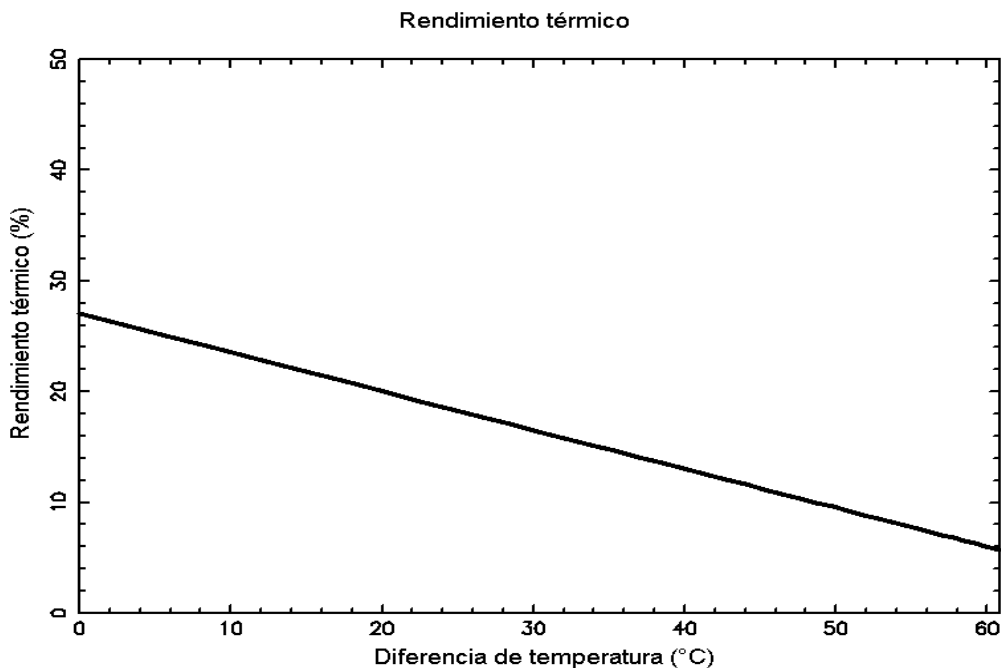
Tabla 1. Muestra los resultados de los parámetros de ajuste del modelo térmico y el error relativo de la aproximación de mínimos cuadrados.

CASO	τ_2 (seg)	U_l $\left(\frac{W}{K}\right)$	I (W)	Error relativo de la aproximación (%)
CJ ₁	21464	2.020	545.0	2.760
CJ ₂	10008	6.469	499.1	1.680
CSR ₁	16250	3.256	561.5	2.057

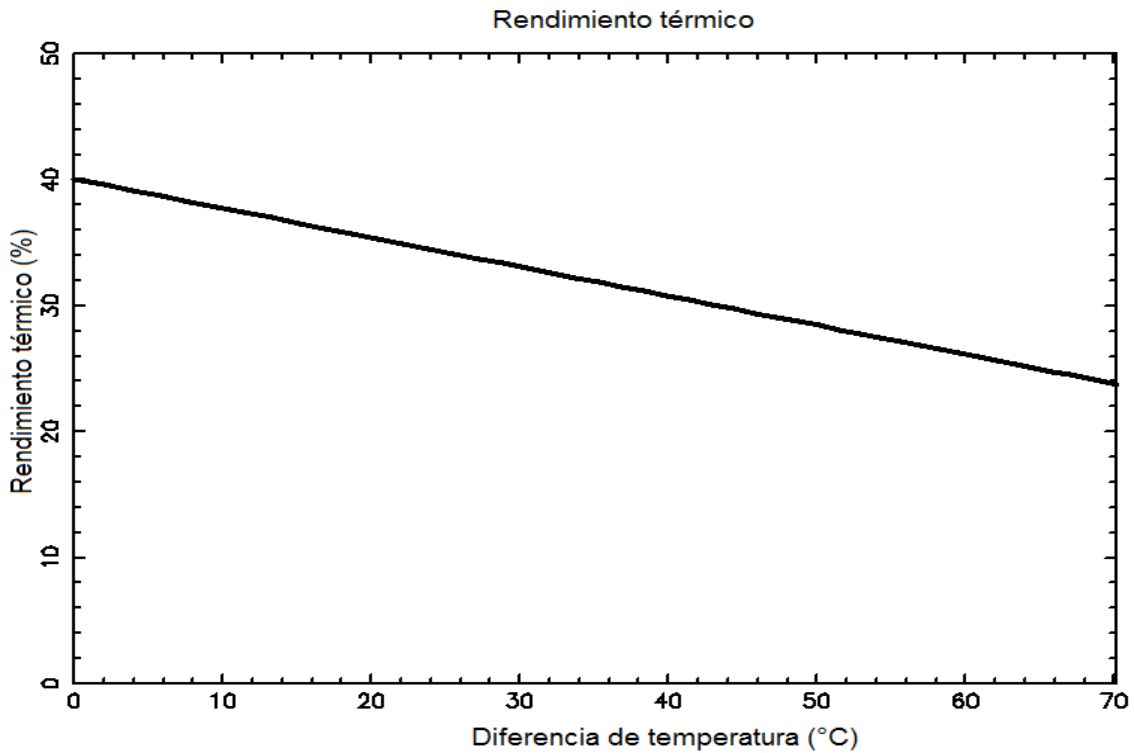
En las gráficas (4), (5) y (6), se muestran los resultados del modelo, para obtener el rendimiento térmico en función de la diferencia de temperatura del agua (dentro del recipiente) y la temperatura del ambiente. Donde se puede observar claramente que el rendimiento con las ollas de aluminio a presión es mucho más alto comparado con el rendimiento de la olla de barro, como es de esperarse de acuerdo a sus propiedades térmicas.



Gráfica 4. Rendimiento térmico para el caso CJ_1

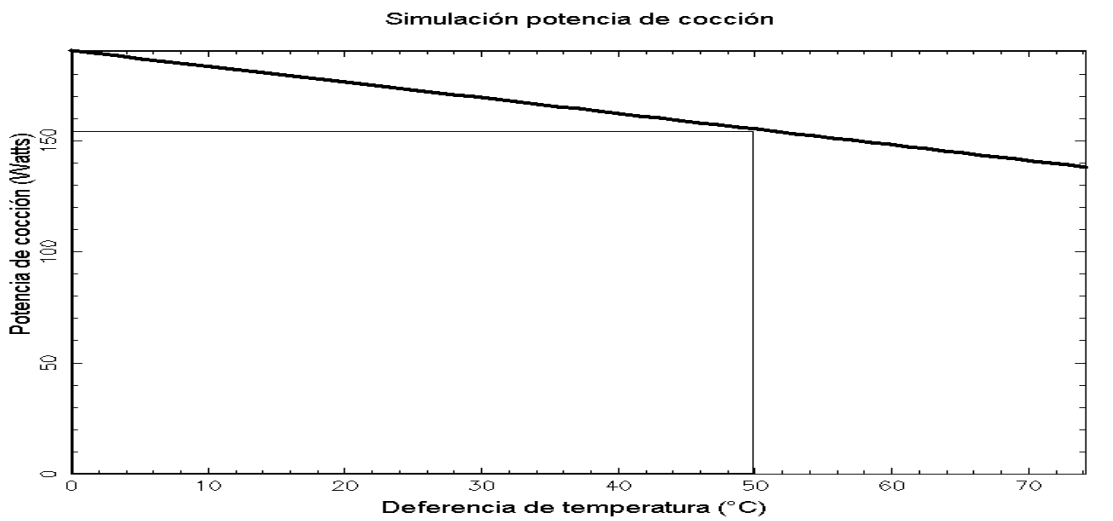


Gráfica 5. Rendimiento térmico para el caso CJ₂.

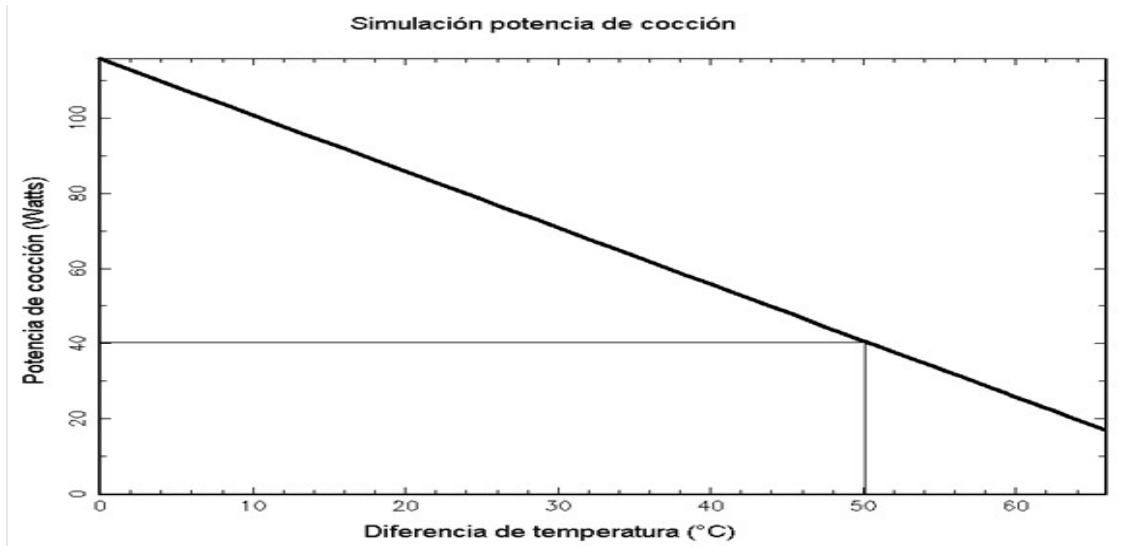


Gráfica 6. Rendimiento térmico para el caso CSR₁

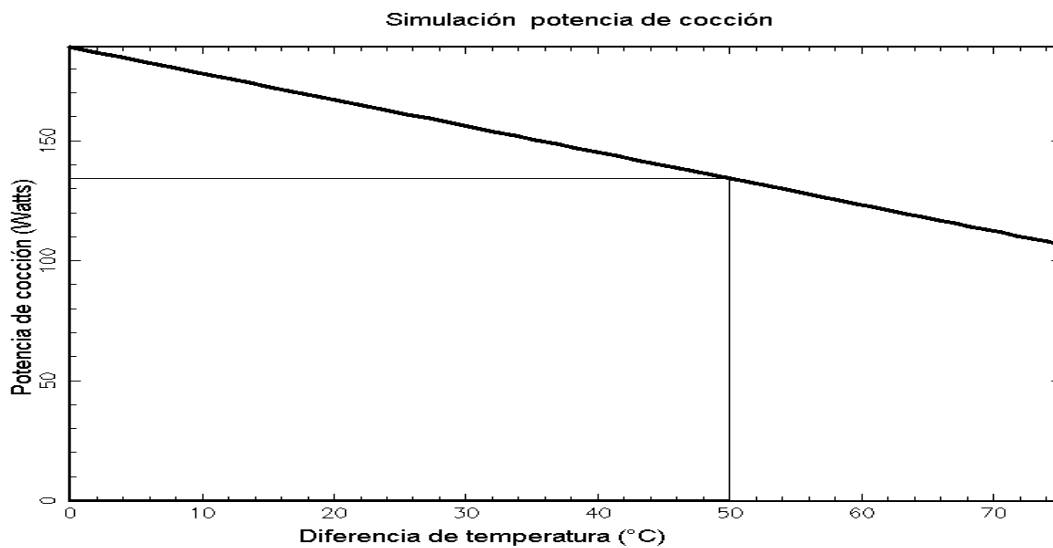
En las gráficas (7), (8) y (9) se muestra la potencia de cocción estándar, en función de la diferencia de temperatura, es decir, cuando la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente es de 50 grados centígrados, para cada uno de los casos considerados.



Gráfica 7. Potencia de cocción estándar de 152 watts, para el caso CJ₁.



Gráfica 8. Potencia de cocción estándar de 40 watts, para el caso CJ₂.



Gráfica 9. Potencia de cocción estándar de 132 watts para el caso CSR₁.

En la tabla 2 se muestran el cálculo de parámetros que describen a la cocina solar desde el punto de vista térmico, a partir del conjunto de parámetros de ajuste de la tabla (1).

Para calcular la irradiancia incidente (I_D), se ha usado la ecuación (3), para calcular el coeficiente de energía total disipada, se divide la el coeficiente de energía disipada por unidad de área entre el área del colector, es decir, $U_L = \frac{U_L}{A_c}$, de la ecuación (5) se obtiene el factor de

intercambio de calor (F'), para calcular la potencia de cocción estándar (P_{cest}) se han usado las ecuaciones (6) y (7), finalmente la ecuación (8) se usó para calcular el rendimiento térmico.

Tabla 2. Muestra los parámetros térmicos de cocinas solares, calculados a través de los parámetros de ajuste.

CASO	$I_D \left(\frac{W}{m^2} \right)$	$U_L \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$	F'	$P_{cest} (W)$	Rendimiento térmico promedio (%)
CJ ₁	811	10.72	0.405	155.2	38.79
CJ ₂	818	47.66	0.271	40.76	12.26
CR ₁	771	17.27	0.371	134.2	30.69

Como resultados adicionales, que se obtienen con el modelo y que no son posibles obtener aplicando los protocolos de prueba son los parámetros siguientes: el coeficiente de energía total disipada (U_L) y el factor de rendimiento de intercambio de calor (F'). Estos parámetros son consistentes y complementan la interpretación física, al existir concordancia con los resultados obtenidos para el rendimiento térmico y la potencia de cocción estándar; en cuanto mayor es el coeficiente de energía total disipada, menores son el rendimiento térmico y la potencia de cocción estandarizada. En este caso, el valor mayor corresponde al caso CJ₂ y el menor al CJ₁. De igual manera, para factores de rendimiento de intercambio mayores, mejor rendimiento térmico y potencia de cocción estandarizada es obtenida.

Para finalizar, la tabla 3 muestra la comparación de los resultados de algunos parámetros estimados con el modelo térmico, con respecto a los que se obtienen aplicando los protocolos de prueba de la cocina solar “Jorhejpatarnskua” (González-Avilés, 2013b) y a la “CSR” (González-Avilés, 2013b). Donde P_{cprot} es la potencia de cocción estandarizada calculada aplicando protocolos de prueba.

Tabla 3. Comparación con los parámetros estimados con el modelo y con los calculados con a través de la aplicación de protocolos estándares.

CASO	P_{cprot} (W)	Error relativo (%)	Rendimiento térmico promedio (%)	Error relativo (%)
CJ ₁	152	2.1	39	0.5
CJ ₂	37	9.2	13	5.7
CR ₁	132	3.0	30	2.2

Conclusión

Se ha formulado un modelo térmico semi-empírico, para estudiar la física térmica de cocinas solares. La utilidad del modelo radica en dos aspectos principales: no se requiere de medir la radiación incidente de manera directa; porque es uno de los parámetros libres de ajuste del modelo y la no dependencia de las condiciones meteorológicas, para la realizar las pruebas. Además, la experimentación se reduce solo a medir de manera directa, la temperatura promedio del agua, hasta el punto de ebullición y la temperatura ambiente, para ajustar las curvas y obtener así los parámetros libres, con los que se calculan las cantidades de interés en los protocolos establecidos para cocinas solares.

Mediante la técnica de mínimos cuadrados se ajustaron los datos experimentales, de la temperatura promedio del fluido, obteniendo el valor para los tres parámetros libres del modelo y el error relativo de las curvas de ajuste a los datos experimentales es menor al 3% en los casos considerados.

De manera específica, a partir del conjunto de parámetros del modelo ha sido posible estimar cantidades que describen el comportamiento térmico de la cocina solar, como son: la potencia de cocción estándar, el rendimiento térmico, el factor de rendimiento de intercambio de calor, así como, el coeficiente total de disipación o pérdidas de calor. Se compara la estimación de la potencia de cocción estándar y el rendimiento térmico, con las que se obtienen aplicando protocolos estándares de prueba, encontrando diferencias menores al 9% en el caso del cálculo de la potencia de cocción y menores al 6% en el caso del rendimiento térmico.

La concordancia de la disminución de la potencia de cocción y del rendimiento térmico de la cocina solar, en términos del aumento del coeficiente de disipación o pérdidas totales de calor y la disminución del factor de rendimiento de intercambio de calor, como parámetros térmicos que son posibles calcular con el modelo térmico y que no se pueden calcular con los protocolos de prueba; representan argumentos de plausibilidad del modelo.

Se ha mostrado que el modelo térmico semi-empírico es útil para el estudio térmico de cocinas solares, sin requerir la medición directa de la radiación. Algunas de las desventajas que se presentan es el hecho de que solo funciona de manera adecuada para cocinas de pequeñas dimensiones para una área máxima del colector de 0.7 metros cuadrados.

Agradecimientos

Agradecemos al proyecto CONACyT número 166126 y a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, el financiamiento para el presente trabajo.

Referencias

ASAE S580, Testing and Reporting Solar Cooker Performance. American Society of Agricultural Engineers, ASAE S580 JAN03, (2003) 824-826.

Burden, R.L. & Faires, J.D., Análisis numérico, Thomson Learning Inc., México, D.F., 7^{ma}. Ed., 2009, pp. 394-397.

González-Avilés, M., Servín Campuzano, H., López Sosa, L.B., González Pérez, D. y Pérez Córdova, D.J. (2012a). Desarrollo de la cocina solar Jorhejpataranskua: Estimación de potencia de cocción. Memorias del XVIII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM), ISBN 978-607-95309-6-9: pp. 1321-1325.

González-Avilés, M., Servín Campuzano, H., López Sosa, L.B. y Pérez Córdova, D.J. (2012b). Modelo térmico semi-empírico para estimar la potencia de cocción y las figuras de mérito de cocinas solares. Memoria 36 Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Cuernavaca, Mor. 1-5 de octubre de 2012. Energía Sostenible para todos. ISBN: 978-607-95019-5-2, pp. 476-478.

González-Avilés, M., Servín Campuzano, H., López Sosa, L.B., y Rodríguez Morales, J.A., (2013a). Development of solar cooker jorhejpataranskua: thermal analysis with different container pots. Poster presentado en el 2º Simposio Internacional sobre Energías Renovables y Sustentabilidad (SIERYS), Instituto de Energías Renovables (UNAM) en Temixco (Morelos).

González-Avilés, M., Servín Campuzano, H., López Sosa, L.B. y Rodríguez Morales, J.A., (2013b). Desarrollo, implementación y apropiación de cocinas solares para el medio rural de

Michoacán: una alternativa energética para la conservación de recursos forestales maderables. Revista Solar de la ANES No. 17, 2013, pp. 12-15.

González-Avilés, M., López, L., & Servín, H. Cocinas Solares: una alternativa energética para el medio rural. (2014). Saarbrücken, Germany: Editorial Académica Española.

Jaramillo, O. (2009). Centro de Investigación en Energía. UNAM. Página Personal. <http://www.cie.unam.mx/~ojs/>

Kundapur, A. & Sudhir, C.V., Proposal for new world standard for testing solar cookers. Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 4 (2009) pp. 272-281.

Murillo, J. M. (2002). Análisis termodinámico de una estufa solar con concentradores de espejos planos. Tesis de Maestría. ESIME-IPN. México, D.F.

Passamai, V., Passamai, T., Pareja, S. y Pizarro, L., (2007) Física térmica de una cocina solar de pequeñas dimensiones, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina.

Rincón E. A, (2008). Cocinas Solares a la Vanguardia en México. Revista Solar de la ANES No. 65, pp. 2-10

Rincón, E, A. (1999). Estado del arte de la investigación de la energía solar en México. México, D.F: Cuadernos Fica.

Senthilkumar, S, Perumal, K & Srinivasan, P. S. (2009). Optical and thermal performance of a three-dimensional compound parabolic concentrator for spherical absorber. Sadhana, Vol. 34, Part 3, pp. 369–380.