

INVESTIGACIÓN EN COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE COCINAS SOLARES EN EL SUR DE LA PENÍNSULA IBÉRICA 2020-2022

Carrillo-Andrés¹, Apaolaza-Pagoaga, X. ^{1*} y Rodrigues Ruivo, C.^{2,3}

1: Universidad de Málaga. Escuela de Ingenierías Industriales. Grupo de Energética. C/ Arquitecto Peñalosa s/n. 29071. e-mail: acarrillo@uma.es, apaolaza@uma.es

2: Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, University of Algarve, Campus da Penha, 8005-139 Faro, Portugal, email: cruivo@ualg.pt

3: ADAI - LAETA, Rua Pedro Hispano nº12, 3030-289, Coimbra, Portugal

Resumen: *Esta comunicación resume el desarrollo de dos años de colaboración entre la Universidad de Málaga y la Universidad del Algarve en la investigación del comportamiento térmico de cocinas solares. Se han puesto a punto unas instalaciones experimentales en Málaga (36.7°N 4.4°W) que permiten el ensayo simultáneo de varias cocinas solares. Se han ensayado hasta la fecha, de forma extensiva, varios modelos de cocina solar tipo panel: Funnel, Copenhagen y Haines, mientras que otros modelos están previstos en un futuro cercano. El trabajo experimental, que es fundamental, se ha complementado con estudios teóricos y numéricos sobre trazado de rayos (ray-tracing), procedimientos de ensayo, etc. Como resultado se han publicado diversos artículos científicos hasta la fecha. Esta comunicación recapitula algunos resultados interesantes que contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento térmico de las cocinas solares.*

Palabras clave: Energía Solar, Cocinas Solares, Experimental, Ray-tracing, Ensayos.

1. INTRODUCCIÓN

Las cocinas solares tienen múltiples aplicaciones: cocinar alimentos, preparar conservas, pasteurizar agua, etc. sin dependencia de fuentes de energía fósil durante su utilización. Se han desarrollado muchos diseños de cocinas solares durante la últimas décadas que se pueden clasificar en tres grandes categorías: i) cocinas que utilizan fluidos caloportadores intermedios, donde el captador solar puede estar alejado de la zona de cocinado, ii) cocinas con almacenamiento de calor, que permiten cocinar cuando no hay radiación solar, y iii) cocinas directas, que son baratas, simples y de fácil fabricación [1]. Dentro de las cocinas solares directas, se realiza la subclasificación entre i) parabólicas, ii) de tipo caja y iii) de paneles [1].

Los estudios que presenta esta comunicación se han hecho sobre cocinas solares de paneles, que son simples, baratas, fáciles de construir, plegables y muy utilizadas, pero han sido poco estudiadas en la literatura científica. Con este tipo de cocinas los alimentos se cocinan lentamente y suelen tener un cobertor alrededor del recipiente de cocinado que genera efecto invernadero. Algunas de las cocinas de paneles más populares son la Cookit [2], HotPot [3], Haines [2], Copenhagen [4] y Funnel [5,6].

Esta comunicación resume los resultados obtenidos en dos años de colaboración entre la Universidad de Málaga y la Universidad de Algarve. Se ha realizado un banco experimental que permite estudiar doce cocinas de forma simultánea y que se ha utilizado en la realización de estudios experimentales con diferentes tipos de cocinas solares. En el marco de esta colaboración también se han realizado otro tipo de trabajos como análisis ópticos utilizando ray-tracing, estudios teóricos y estudios sobre los protocolos de ensayo y el procesado de datos.

2. MATERIALES Y METODOS

Se ha puesto en marcha un banco experimental situado en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, que permite ensayar hasta 12 cocinas solares simultáneamente. Está compuesto por las diferentes cocinas solares a estudiar, un conjunto de mamparas para reducir el viento, dos sistemas de adquisición Campbell Scientific CR1000 con una frecuencia de adquisición de 1min y de la instrumentación correspondiente (Fig. 1).



Figura 1. Banco experimental.

La instrumentación del banco tiene tres partes diferenciadas.

- La estación meteorológica de la Escuela de Ingenierías que está situada en un poste 10m por encima del área de trabajo, que se utiliza para medir la radiación global horizontal y la radiación difusa horizontal.

- La estación meteorológica local, que está compuesta de un piranómetro de radiación global en un plano horizontal y de un segundo idéntico en un plano inclinado de 50°, de un anemómetro y una sonda Pt100 que mide la temperatura ambiente.
- Un conjunto de 60 termopares, que se pueden posicionar en el agua o en diferentes posiciones en el cazo dependiendo de cada ensayo.

Para procesar el gran volumen de datos de ensayo, se han desarrollado scripts específicos en los lenguajes Python y R.

Los estudios presentados se han basado principalmente el protocolo de ensayo y en el método propuesto por la norma ASAE S580.1 [7]. Esta norma utiliza una carga de 7 kg m⁻² de agua por metro cuadrado de apertura de las cocinas y fija las condiciones en las que hay que realizar los ensayos, estableciendo rangos obligatorios para las diferentes variables no controladas, como radiación solar, la temperatura y el viento. El procesado de las medidas de ensayo permite obtener la potencia absorbida por el agua \dot{Q}_s para cada momento. Luego esta potencia se pone en función de la diferencia de temperaturas entre el agua y el ambiente $\Delta T_{w,a}$, y se normaliza para una radiación directa global de 700 W/m². Se procede a un ajuste de las observaciones, típicamente lineal y se extrae el valor de potencia estándar para $\Delta T_{w,a}=50^\circ\text{C}$, denominado $\dot{Q}_{S,50}$, que se considera un valor de la potencia estándar representativo de un proceso habitual de calentamiento de agua desde ambiente hasta temperatura próxima a la ebullición. Este parámetro permite comparar cocinas de forma sencilla.

Por otra parte, se han realizado dos estudios basados el método de Lahkar et al. [8], donde el fluido utilizado es la glicerina, y que permite analizar las cocinas solares en temperaturas intermedias, más allá de la ebullición del agua. Este método da como resultado el parámetro denominado opto-thermal ratio (COR) que se define como la relación entre la eficiencia óptica y el factor de pérdidas de calor [8].

3. RESULTADOS

Este apartado recapitula los resultados más interesantes.

3.1. Estudio experimental basado en la norma ASAE de una cocina solar Funnel [5].

Basándose en la Norma ASAE S580.1 [7] se realizó un amplio estudio experimental (41 ensayos) de dos cocinas Embudo trabajando en paralelo. Los principales resultados fueron:

- La potencia estándar de la cocina es un 46% mayor cuando se utiliza una tapa de cristal (73 W) frente a utilizar una de metal oscuro (51 W) (Fig. 2)
- Se obtuvieron resultados robustos, introduciendo en el procesado de datos una estimación de la incertidumbre mediante intervalos de predicción y confianza (Fig.2)
- Se utilizó con éxito una mezcla de agua y hielo para obtener observaciones válidas en valores de $\Delta T_{w,a}$ reducidos. (Fig. 2)

3.2. Estudio experimental para temperaturas intermedias de una cocina solar Funnel [9].

En este estudio se ha utilizado el método de Lahkar et al. [8] para analizar dos cocinas Embudo en el rango de temperaturas intermedias. Se demostró que se pueden alcanzar temperaturas de hasta 150°C con este tipo de cocinas, lo que aumenta su utilizabilidad. Se han caracterizado las cocinas mediante la realización de 16 ensayos, obteniendo los valores de COR 0.157 m²C/W con el uso de efecto invernadero y COR 0.110 m²C/W sin el efecto invernadero

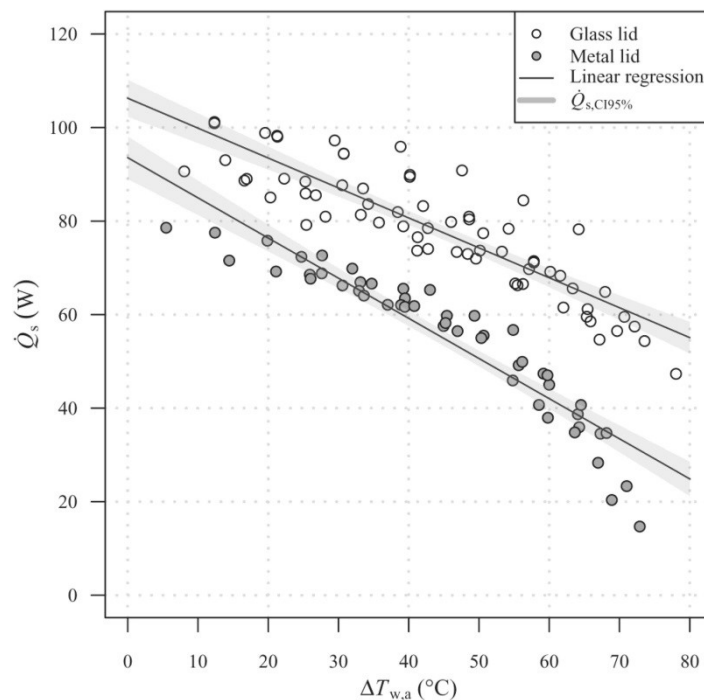


Figura 2. La \dot{Q}_s en función del $\Delta T_{w,a}$ para el recipiente con tapa de cristal y de metal.

3.3. Nuevo método de análisis de mejoras de diseño en cocinas solares [10]

En este análisis se ha desarrollado un nuevo método basado en la Norma ASAE S580.1 que permite analizar las pequeñas mejoras de diseño en cocinas solares. Este nuevo método se basa en la realización de ensayos en paralelo y gracias a la utilización de la representación de densidad de residuales, se consigue anular el ruido generado por las variables incontroladas de los ensayos y poder cuantificar las mejoras.

- Se ha validado el método mediante la realización de 47 ensayos utilizando diferentes soportes que modifican la altura del recipiente de cocinado.
- La variación de potencia asociada a la modificación de la altura del recipiente es reducida, del orden de 5W, que este método permite cuantificar.
- Colocar el recipiente a una altura de 25mm supone una mejora de potencia estandarizada de 6W (7% de mejora), y 3W el de 50mm, siendo perjudicial la utilización de alturas mayores más grandes.

3.4. Análisis de la idoneidad de la utilización de la regresión lineal para temperaturas intermedias[11]

En este artículo se han abordado diferentes enfoques del modelado lineal de las curvas de potencia en función de $\Delta T_{w,a}$, analizando la influencia sobre la Norma ASAE S580.1 y el método de Lahkar et al. [8]. Para validar este desarrollo teórico se han utilizado ensayos realizados con una cocina Embudo y glicerina, constatando desviaciones de los valores experimentales respecto al modelado lineal. Estas desviaciones han sido mayores en los ensayos analizados con cocinas de tipo caja, usando aceite de cacahuete.

3.5. Estudio experimental basado en la norma ASAE de una cocina solar Copenhagen [4]

En este estudio se ha caracterizado la cocina solar Copenhagen basándose en la Norma ASAE S580.1. Para ello se han realizado 49 ensayos. Los principales resultados:

- Se ensayaron tres cocinas en paralelo, cada una en una configuración: *Ninety*, *Cave* and *Flower*

- Se han realizado ensayos para diferentes cargas de agua.
- Se ha analizado la influencia de la altura solar, para ello se han diseñado y realizado innovadores ensayos en vacío (Fig. 3).
- Se ha constatado tanto en los ensayos en vacío, como en los ensayos con carga de agua que la configuración *Ninety* es la mejor por debajo de 65° de altura solar y que la configuración *Flower* es la mejor por encima de esta altura solar.

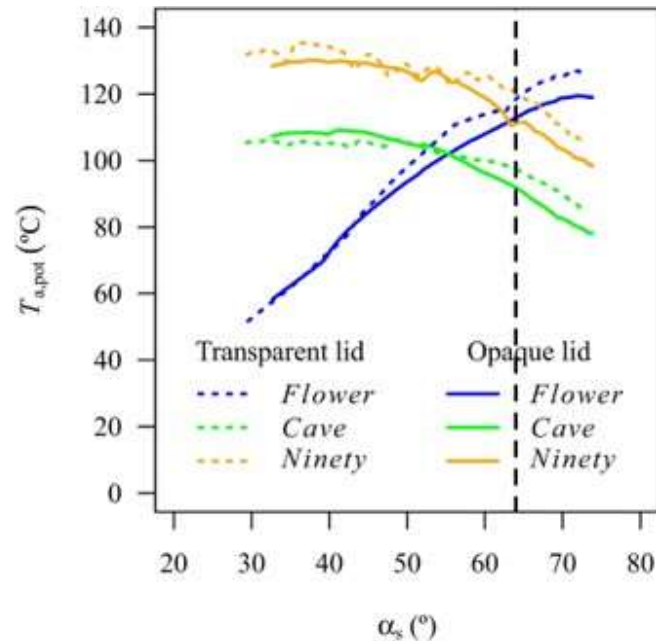


Figura 3. Evolución de la temperatura dentro del recipiente para las tres configuraciones en los innovadores ensayos en vacío.

3.6. Estudio de ray-tracing de una cocina Funnel [6]

Se realizó un estudio en profundidad de ray-tracing utilizando el programa Soltrace[12], para caracterizar la cocina Funnel. Los resultados:

- La cocina tiene una eficiencia óptica de 0.37 para propiedades ópticas realistas y una incidencia normal.
- Se han realizado mapas de densidad de flujo de radiación sobre el recipiente.
- Se han estudiado qué parte de los reflectores tiene más importancia a la hora de reflejar radiación al recipiente (Fig. 4.a)
- Se ha investigado la dependencia de la eficiencia óptica en función del ángulo de incidencia (Fig. 4.b)

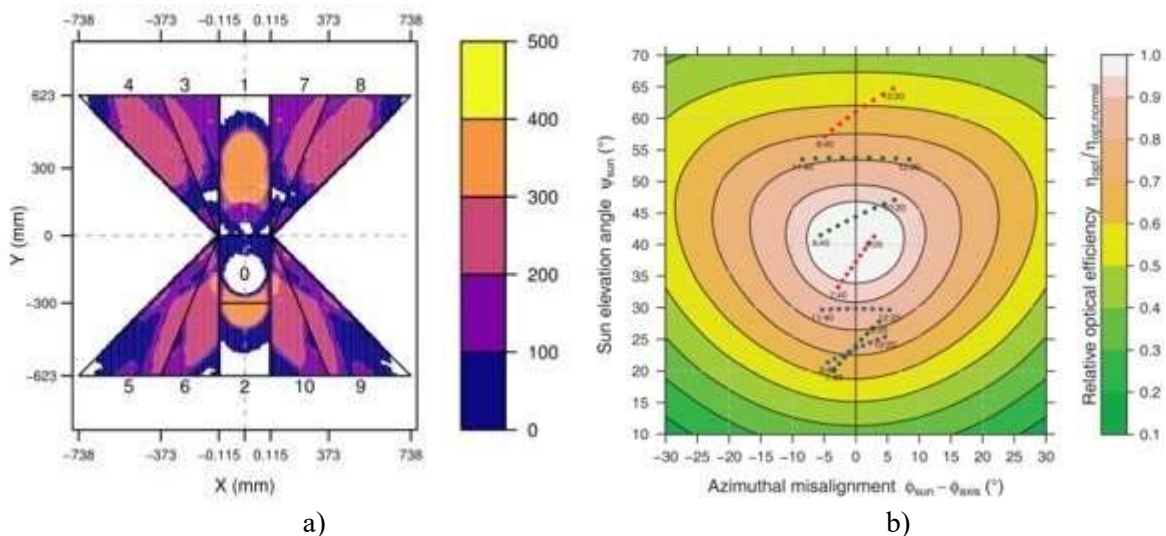


Figura 4. a) Densidad del flujo de radiación que se refleja en el área del reflector y termina en el cazo. b) Mapa de eficiencia óptica en función de las desorientaciones en altura solar y azimut.

4. CONCLUSIONES

Las cocinas solares son dispositivos de gran importancia como herramientas para luchar contra la pobreza energética. Aunque tecnológicamente suelen ser sencillas, su diseño óptimo es un reto. Por esto es importante la investigación que se puede llevar a cabo desde organismos como las Universidades. Los resultados de la investigación sirven de guía para obtener mejores diseños. En estos dos años de colaboración entre la Universidad de Málaga y la Universidad del Algarve se han puesto a punto los equipos y procedimientos para la caracterización rigurosa del rendimiento térmico de cocinas solares. Se han obtenido una serie de resultados de interés para la comunidad de usuarios, diseñadores y fabricantes de cocinas solares, que se han publicado en 6 artículos JCR. El trabajo continúa, actualmente analizando otros modelos de cocinas solares.

REFERENCIAS

- [1] M. Aramesh, M. Ghalebani, A. Kasaeian, H. Zamani, G. Lorenzini, O. Mahian, S. Wongwises, A review of recent advances in solar cooking technology, *Renew. Energy* 140 (2019) 419-435, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.021>.
- [2] Test Results, Solar Cookers International. <https://www.solarcookers.org/work/research/results>, consultado el 2022.02.22. (Accessed 15 February 2021).
- [3] S.M. Ebersviller, J.J. Jetter, Evaluation of performance of household solar cookers, *Sol. Energy* 208 (2020) 166–172, <https://doi.org/10.1016/j.solener>.
- [4] X. Apaolaza-Pagoaga, A. Carrillo-Andrés, C. Ruivo, Experimental thermal performance evaluation of different configurations of Copenhagen solar cooker, *Renew. Energy* 184 (2022) 604-618, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.105>.
- [5] C. Ruivo, A. Carrillo-Andrés, X. Apaolaza-Pagoaga, Experimental determination of the standardised power of a solar funnel cooker for low sun elevations. *Renew. Energy* 170 (2021) 364–374, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.146>.
- [6] A. Carrillo-Andrés, X. Apaolaza-Pagoaga, C. Rodrigues Ruivo, E. Rodríguez-García, F. Fernández-Hernández, Optical characterization of a funnel solar cooker with azimuthal sun tracking through ray-tracing simulation. *Solar Energy* 233 (2022) 84-95, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.027>.
- [7] ASAE S580.1 NOV2013, Testing and reporting solar cooker performance, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA, 2013

- [8] Lahkar, P.J., Samdarshi, S.K., 2010. A review of the thermal performance parameters of box type solar cookers and identification of their correlations. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 1615–1621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.009>
- [9] X. Apaolaza-Pagoaga, A.A. Sagade, C. Rodrigues Ruivo, A. Carrillo-Andrés, Performance of solar funnel cookers using intermediate temperature test load under low sun elevation. *Solar Energy* 225 (2021) 978-1000, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.006>.
- [10] X. Apaolaza-Pagoaga, A. Carrillo-Andrés, C. Rodrigues Ruivo, New approach for analysing the effect of minor and major solar cooker design changes: Influence of height trivet on the power of a funnel cooker, *Renewable Energy*, Volume 179, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.025>.
- [11] C. Ruivo, X. Apaolaza-Pagoaga, G. Di Nicola, A. Carrillo-Andrés, On the use of experimental measured data to derive the linear regression usually adopted for determining the performance parameters of a solar cooker. *Renew. Energy* 181 (2021) 105-115, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.047>.
- [12] Wendelin, T., Dobos, A., Lewandowski, A., 2013. SolTrace: A ray-tracing code for complex solar optical systems. *Contract* 303 (October), 275–300, URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/59163.pdf>.