

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA COCINA SOLAR CRISOL

Apaolaza-Pagoaga X.*, Carrillo-Andrés A.* Giurgevich F.*, Ruivo, C.**

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

** Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve, Campus da Penha, Faro, 8005-139, Portugal,
e-mail: cruivo@ualg.pt
ADAI - LAETA, Rua Pedro Hispano nº12, 3030-289, Coimbra, Portugal

RESUMEN

La cocina solar 'Crisol' es un diseño reciente, que se enmarca en el subgrupo de cocinas de paneles (Aramesh et al. 2019). Su reflector se basa en la combinación de dos superficies sencillas: una de tipo cilindro parabólico y un rectángulo plano. En función del ángulo de elevación del sol esta cocina puede utilizarse en dos posiciones, la de Sol Alto y la de Sol Bajo. Su construcción es sencilla, de bajo coste, y tiene un buen desempeño según sus usuarios. Sin embargo, no hay disponible ningún estudio que caracterice formalmente su rendimiento térmico.

Este trabajo analiza experimentalmente el comportamiento térmico de la cocina Crisol. Los ensayos se realizan con hasta cuatro cocinas de forma simultánea, para minimizar la dependencia de los resultados con las variables meteorológicas. El protocolo experimental sigue la norma ASAE S508.. Se estudian las dos configuraciones de la cocina, y se analiza la influencia del ángulo de elevación del sol.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Cocinas Solares, Experimental, Cocina Solar Crisol.

ABSTRACT

The 'Crisol' solar cooker is a recent design, which is classified in the subgroup of panel cookers (Aramesh et al. 2019). Its reflector is based on the combination of two simple surfaces: a parabolic trough, and a flat rectangle. Depending on the solar elevation angle, this cooker can be used in two positions, High Sun and Low Sun. Its construction is simple, low cost, and has a good performance according to its users. However, there are no studies that characterize formally its thermal performance.

This work experimentally analyzes the thermal behavior of the Crisol cooker. The tests are conducted with up to four cookers simultaneously, to minimize the dependence of the results on meteorological variables. The experimental protocol follows the ASAE S508.1 standard. The two configurations of the cooker are studied, and the influence of solar elevation is analyzed.

KEYWORDS: Solar Energy, Solar Cookers, Experimental, Crisol Solar Cooker.

INTRODUCCIÓN

Las cocinas solares cocinan alimentos gracias a la radiación solar, para ello a lo largo de las últimas décadas se han desarrollado muchos diseños, que utilizan diferentes soluciones tecnológicas (Aramesh et al. 2019). Entre los diferentes subgrupos de cocinas solares, las cocinas solares de paneles tienen varias ventajas: de simple construcción, baratas, ligeras, plegables, etc. (Aramesh et al. 2019). La cocina solar Crisol desarrollada por el argentino Esteban Roulet se enmarca en este subgrupo.

Este estudio analiza experimentalmente la cocina solar Crisol, que según los cocineros solares tiene un buen desempeño, pero que aún no ha sido estudiada en la literatura científica. Para ello se han realizado ensayos con carga de agua siguiendo la norma ASAE S508.1, para las dos configuraciones de la cocina: *Sol Alto* y *Sol Bajo*. Estos ensayos se han realizado en diferentes épocas del año en la Universidad de Málaga. También se han realizado ensayos sin carga para analizar la dependencia de la cocina en función de la elevación del sol (Apaolaza et al. 2022). Estos resultados experimentales han permitido cuantificar la potencia útil de las dos configuraciones de la cocina solar Crisol en diferentes épocas del año y decidir que configuración es la más adecuada en función de la elevación del sol.

MATERIALES Y METODOS

Para realizar este estudio, se han construido cuatro cocinas Crisol idénticas. Con el objetivo de validar la repetibilidad de la construcción y para poder realizar ensayos en paralelo y así poder minimizar el impacto de las variables incontroladas (temperatura ambiente, radiación, velocidad del viento, etc.). Cada cocina está construida según las instrucciones del diseñador, Esteban Roulet (Construcción de la cocina solar CRISOL). Cada cocina está constituida de dos superficies sencillas: un cilindro parabólico, y un rectángulo plano, que se han fabricado a partir de dos rectángulos de tablero DM de 3 mm de espesor y dimensiones 60 x 151 cm y 60 x 109 cm. El soporte que eleva el recipiente de cocinado también se ha fabricado, siguiendo las mismas instrucciones, con el mismo tablero DM. Las superficies se han recubierto con material reflectante Mylar (92% Polietileno tereftalato (PET), 4% Aluminio, 4% Resina). La construcción de la cocina es la misma para las configuraciones de *Sol Alto* y *Sol Bajo*, lo que varía entre las configuraciones es la colocación del conjunto. El recipiente, tapa de cristal y efecto invernadero de cristal son los mismos utilizados en trabajos precedentes (Ruivo et al. 2021, 2022a, 2022b, Apaolaza et al. 2021a, 2021b, 2022).

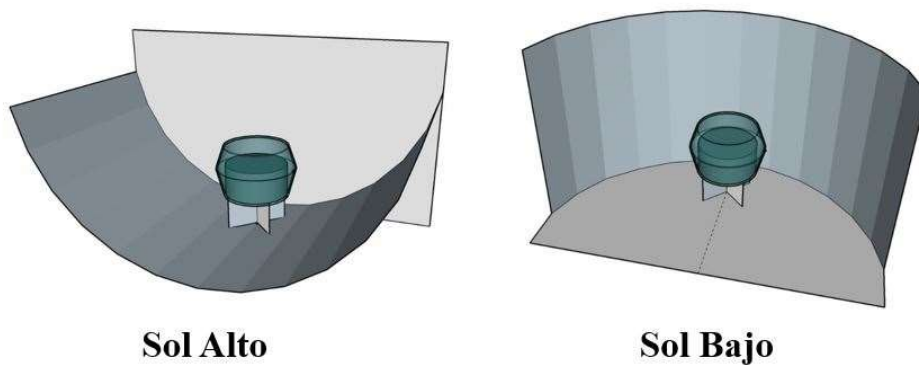


Fig. 1. Esquema de las configuraciones de *Sol Alto* y *Sol Bajo*.

El banco experimental utilizado en este estudio está situado en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga (Ruivo et al. 2021, 2022a, 2022b, Apaolaza et al. 2021a, 2021b, 2022). Está compuesto por:

- Las cuatro cocinas Crisol,
- Un conjunto de mamparas para reducir el viento,
- La estación meteorológica de la Escuela que está situada en un poste 10 m 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 tiene 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.
- Dos sistemas de adquisición Campbell Scientific CR1000 con multiplexores, que tienen una frecuencia de adquisición de 1min. Un conjunto de 144 termopares, que se pueden posicionar en el agua o en diferentes posiciones del conjunto dependiendo de cada ensayo.

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

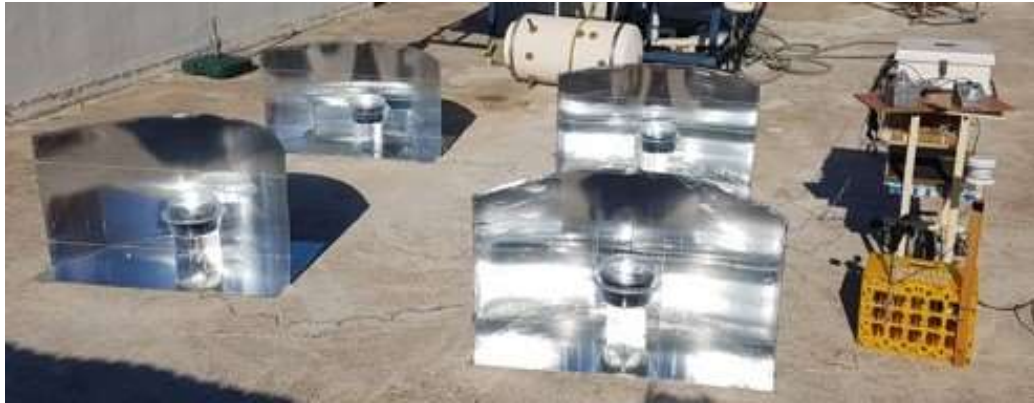


Fig. 2. Dispositivo experimental con cuatro cocinas Crisol.

La parte de este estudio que utiliza la carga de agua se ha basado principalmente el protocolo de ensayo y en el método propuesto por la norma ASAE S580.. En este estudio la carga de 7 kg m^{-2} de agua por metro cuadrado de apertura de las cocinas propuesto por la norma no se ha respetado, ya que se considera una relación demasiado alta para simular el cocinado de alimentos (Ruivo et al. 2021). Se ha decidido utilizar la misma carga de agua de 2 kg propuesta por Ruivo et al. 2021. Si embargo si se han respetado las condiciones en las que hay que realizar los ensayos y los rangos obligatorios para las diferentes variables no controladas, como radiación solar, la temperatura y el viento, que establece la norma ASAE S580.1.

El procesado del ensayo permite obtener la potencia absorbida por el agua para cada instante. Luego esta potencia se pone en función de la diferencia de temperaturas entre el agua y el ambiente, y se normaliza para una radiación global normal de 700 W/m^2 . Se procede a un ajuste de las observaciones, típicamente lineal y se extrae el valor de potencia estándar para $\Delta T_{v,a}=50^\circ\text{C}$, denominado $\dot{Q}_{S,50}$, que es 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.

Para realizar los ensayos sin carga, se ha utilizado el protocolo establecido por Apaolaza et al. 2022. Al que se le ha añadido una mejora, que se basa en montar las cocinas sobre un plano inclinado, que permite simular elevaciones del sol desde los 0° hasta los 90° .

RESULTADOS

Las cocinas solares Crisol solo se orientan en azimut cada 20min durante un ensayo, no se orientan en elevación del sol. Esto hace que la eficiencia de estas cocinas tenga una gran dependencia de la elevación del sol. Cada configuración: *Sol Alto* y *Sol Bajo* va a ser más eficiente en un rango de elevación del sol diferente. Para poder definir ese rango, se han realizado 8 ensayos con dos cocinas cada una en una configuración en los meses de mayo y junio. Estos ensayos se han realizado siguiendo el protocolo de Apaolaza et al. 2022. Al que se le ha añadido una mejora, que consiste en realizar 3 grupos de ensayos: el primero con las cocinas en horizontal. El segundo con las cocinas en un plano inclinado de -20° , para obtener resultados a partir de 0° de elevación del sol. El tercero con un plano inclinado de $+15^\circ$, para obtener resultados hasta los 90° de elevación del sol. Los resultados obtenidos se han representado en la Fig.3, donde cada ensayo se ha representado como el diferencial de temperatura entre el interior del cazo y la temperatura ambiente, normalizado a la radiación estandarizada. Esto se ha hecho con el objetivo de minimizar el impacto de las variables incontroladas de temperatura ambiente y radiación.

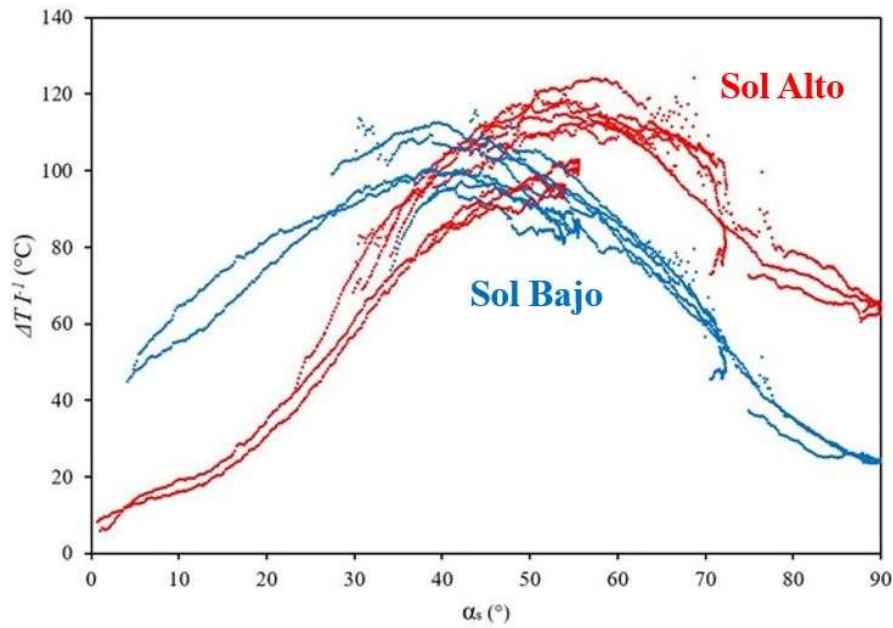


Fig. 3. Evolución del diferencial de temperatura normalizado con la radiación en función del ángulo de elevación del sol.

Analizando la Fig.3 se puede sacar varias conclusiones del comportamiento en vacío de la cocina Crisol. La primera es que la configuración *Sol Bajo* va a tener un máximo de eficiencia entorno a 40° y que la configuración *Sol Alto* la tendrá entorno a 55° . La segunda es que por debajo de más o menos 45° la configuración *Sol Bajo* es la más eficiente y que por encima es la *Sol Alto*.

Para validar los resultados obtenidos sin carga y para poder cuantificar la potencia útil de las diferentes configuraciones, se han realizado 12 ensayos en la configuración *Sol Alto* y 14 en la configuración *Sol Bajo*, entre los meses de enero y junio. La Fig. 4 y la Fig. 5 muestran la evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para *Sol Bajo* y *Sol Alto* respectivamente. En estas dos figuras además cada punto experimental tiene un color asignado, que representa la elevación del sol de ese rango, lo cual permite tener una representación visual de la influencia de la elevación del sol sobre la potencia estandarizada.

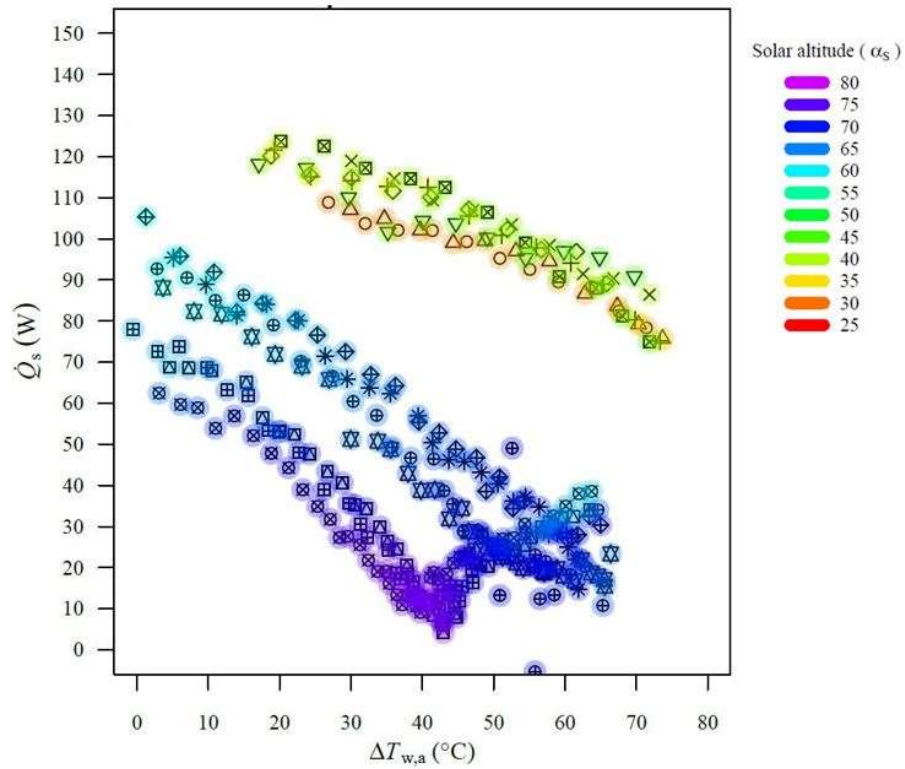


Fig. 4. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para todos los ensayos en configuración *Sol Bajo*.

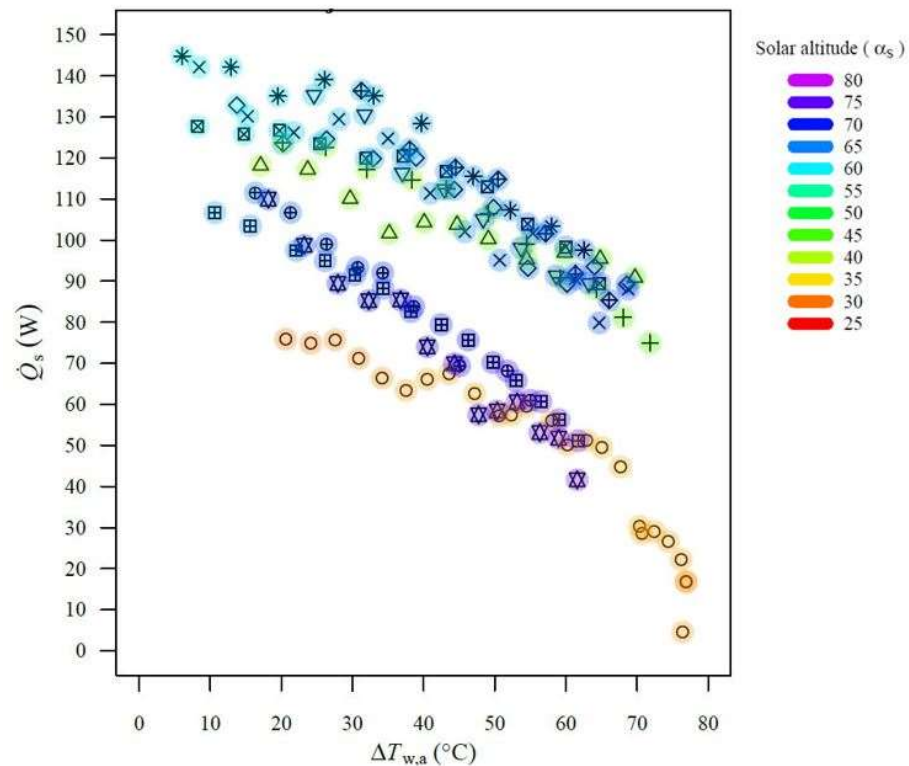


Fig. 5. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para todos los ensayos en configuración *Sol Alto*.

Si analizamos las Fig. 4 y la Fig. 5, podemos ver que el máximo para la configuración *Sol Bajo* se va a dar entorno a los 40-45° y que el máximo para *Sol Alto* se va a dar entorno a los 60-65°. Lo cual coincide aproximadamente con los resultados obtenidos en los ensayos sin carga, teniendo en cuenta que los fenómenos físico-térmicos no son los mismos en los dos casos.

Como establece la norma ASAE S580.1, para obtener el número mínimo de puntos experimentales, se han repetido tres veces los ensayos para las elevaciones del sol que maximizan la potencia en las dos configuraciones. En la configuración de *Sol Bajo*, se han realizado tres ensayos en elevaciones del sol medias de entre 37-41°, obteniendo una potencia estándar para $\Delta T_{w,a}=50^{\circ}\text{C}$, denominado $\dot{Q}_{S,50}$ de 101.5 W. Se han realizado otros tres ensayos para la configuración Sol Alto entre 63-65°, obteniendo un $\dot{Q}_{S,50}$ de 108.1 W. Estos resultados están representados en la Fig. 6.

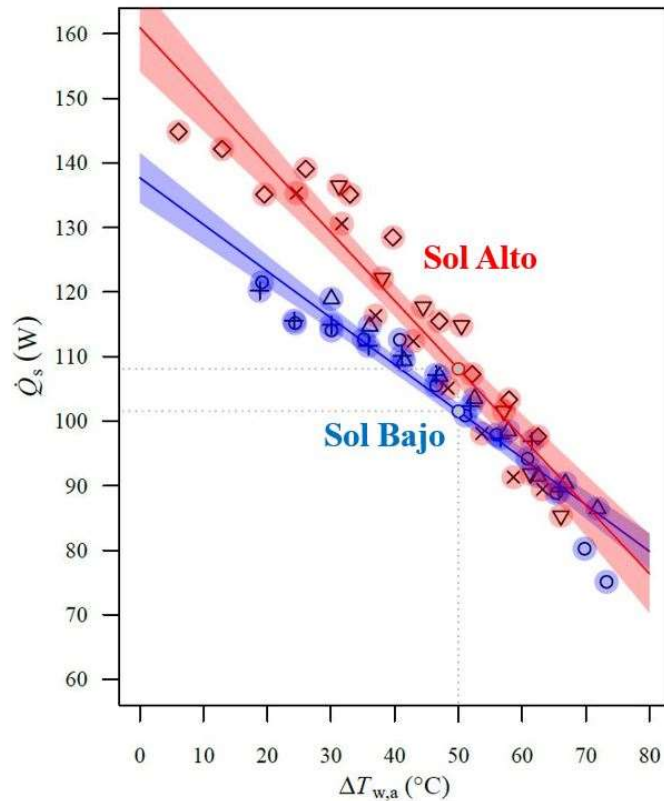


Fig. 6. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para los máximos de cada configuración.

CONCLUSIONES

Gracias a este estudio, se ha podido cuantificar la potencia útil estandarizada de la cocina Crisol siguiendo la norma ASAE S580.1 en un amplio rango de elevaciones del sol, identificando sus máximos para las configuraciones de *Sol Bajo* y *Sol Alto*, 101.5 W y 108.1 W respectivamente. También se han realizado ensayos en vacío, que permiten conocer en que rango de elevaciones del sol es más eficiente cada configuración, viendo que la inflexión entre las dos configuraciones se da para un ángulo de elevación del sol de 45°.

REFERENCIAS

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>.

Apaolaza-Pagoaga, X., Sagade, A.A., Ruivo, C.R., Carrillo-Andrés, A., 2021a. Performance of solar funnel cookers using intermediate temperature test load under low sun elevation. *Sol. Energy* 225, 978–1000. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.006>.

Apaolaza-Pagoaga, X., Carrillo-Andrés, A., Ruivo, C.R., 2021b. 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. *Renew. Energy* 179, 2071–2085. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.025>.

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>.

ASAE S580.1 NOV2013, Testing and reporting solar cooker performance, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA, 2013.

Construcción de la cocina solar CRISOL. Esteban Roulet. https://www.youtube.com/watch?v=AlnhyiYP_6A

Ruivo, C.R., Carrillo-Andrés, A., Apaolaza-Pagoaga, X., 2021. Experimental determination of the standardised power of a solar funnel cooker for low sun elevations. *Renew. Energy* 170, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.146>.

Ruivo, C.R., Apaolaza-Pagoaga, X., Di Nicola, G., Carrillo-Andrés, A., 2022a. 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, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.047>.

Ruivo, C.R., Apaolaza-Pagoaga, X., Coccia, G., Carrillo-Andrés, A., 2022b. Proposal of a non-linear curve for reporting the performance of solar cookers. *Renew. Energy* 191, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.026>.