

## OPTIMIZACION EXPERIMENTAL DE LA GEOMETRIA DE LA COCINA SOLAR COPENHAGEN

**Apaolaza-Pagoaga X.\*, Carrillo-Andrés A.\*, 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/RESUMO

La cocina solar Copenhagen tiene paneles reflectantes flexibles que se pueden configurar para adaptar su geometría al ángulo de elevación del sol. Este estudio explora variaciones sobre las geometrías propuestas por la diseñadora original de la cocina Copenhagen, Sharon Clausson. Se utilizan las piezas originales y se modifican solo los puntos de unión para obtener geometrías modificadas del concentrador solar. Se realizan ensayos experimentales con tres cocinas simultáneamente, cada una de las cocinas en una configuración diferente, siguiendo la norma ASAE S508.1. El objetivo es optimizar la geometría para maximizar la potencia útil para diferentes alturas solares.

**PALABRAS CLAVE:** Energía Solar, Cocinas Solares, Experimental, Cocina Solar Copenhagen.

### ABSTRACT

The Copenhagen solar cooker has flexible reflective panels that can be configured to adapt the geometry to the sun elevation angle. This study explores some variations of the geometries proposed by the original designer of the Copenhagen solar cooker, Sharon Clausson. Original reflective panels are used, only the joining points are modified to obtain alternative geometries of the solar concentrator. Experimental tests are conducted with three solar cookers simultaneously, each of the cookers in a different configuration, following the ASAE S508.1 standard. The objective is to optimize the geometry to maximize the useful power for different sun elevation angles.

**KEYWORDS:** Solar Energy, Solar Cookers, Experimental, Copenhagen Solar Cooker.

## INTRODUCCIÓN

Las cocinas solares son dispositivos sencillos que permiten cocinar sin la necesidad de una fuente de energía fósil. Dentro de los diferentes diseños de cocinas solares desarrollados en las últimas décadas (Aramesh et al. 2019), las cocinas solares de paneles son muy populares por tener ciertas ventajas: construcción sencilla, empleo de materiales accesibles, buena portabilidad, etc. Un modelo de cocina panel muy conocido es la ‘Copenhagen Solar Cooker’, que es una cocina ligera, de reflectores flexibles, que permite ser ensamblada en diferentes configuraciones para adaptarse a diferentes ángulos de elevación del sol, lo cual permite utilizarla durante todo el año.

Este estudio plantea variaciones sobre las geometrías originales propuestas por la diseñadora de la cocina Copenhagen, Sharon Clausson, con el objetivo de aumentar la potencia útil. Se utilizan los paneles reflectantes originales, sin modificar, solo se varían los puntos de unión entre los reflectores. La optimización de la geometría se ha realizado para tres ángulos de elevación solar medio diferentes, bajo: 34-35°, medio: 66-68° y alto: 72-75°, que corresponden a los meses de noviembre, mayo y julio en Málaga, latitud 36,7° N. Se ensayan dos configuraciones geométricas nuevas para elevación solar alta y otras dos configuraciones nuevas para elevación solar baja y media. Se sigue el protocolo experimental de la norma ASAE S508.1

## MATERIALES Y METODOS

Se utilizan tres unidades de cocina solar Copenhagen, junto con recipientes de cocinado de hierro esmaltado de 20cm de diámetro y 10cm de altura y tapa de cristal transparente. Alrededor de los recipientes se coloca una cobertura formada por dos piezas de vidrio para generar efecto invernadero. Todos los detalles geométricos y constructivos se pueden consultar en Apaolaza et al. (2022). Las configuraciones estudiadas para ángulos de elevación del sol altos son las de la Fig. 1. Además de la configuración original *Original Flower*, se han desarrollado dos configuraciones más: *Big Flower* y *Medium Flower*. Para configuraciones de ángulos de elevación del sol medios y bajos, se han desarrollado dos nuevas configuraciones: *Star* y *Square*, que se van a comparar a la configuración original prevista para estos casos, *Ninety*, Fig. 2.

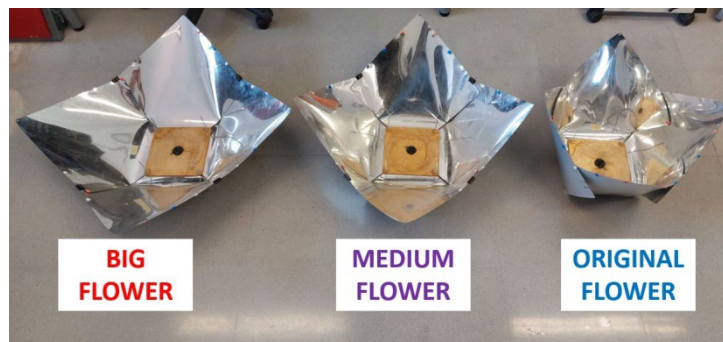


Fig. 1. Configuraciones de la cocina solar Copenhagen para ángulos de elevación del sol altos.

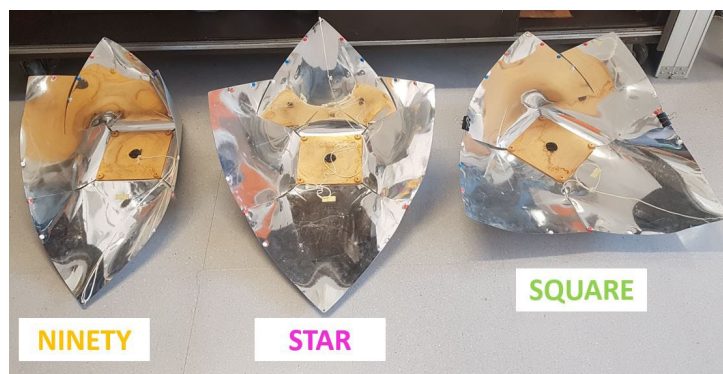


Fig. 2. Configuraciones de la cocina solar Copenhagen para ángulos de elevación del sol medios y bajos.

Para realizar este estudio se ha utilizado el banco experimental situado en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga (Ruivo et al. 2021). 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. Donde su principal instrumentación es la siguiente:

- 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 144 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 códigos específicos en los lenguajes Python y R.

Este estudio se ha basado principalmente el protocolo de ensayo y en el método propuesto por la norma ASAE S580.1. Esta norma fija las condiciones en las que hay que realizar los ensayos y establece 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 para cada momento. Luego esta potencia se pone en función de la diferencia de temperaturas entre el agua y el ambiente, y se normaliza para una radiación directa global de 700 W/m<sup>2</sup>. 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. En este estudio se utiliza una carga de agua de 1.5 kg que se considera representativa de un uso práctico de esta cocina.

## RESULTADOS

El estudio experimental se ha realizado ensayando tres cocinas en paralelo, donde cada una de las cocinas estaba en una configuración diferente (Apaolaza et al. 2022). Este proceso se ha repetido tres veces durante tres días próximos entre sí. Estos grupos de tres ensayos se han repetido tres veces, para elevaciones del sol diferentes.

El primer grupo de ensayos se realizó en el mes de noviembre, con elevación del sol baja, en el rango 34-35°. La evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente de estos ensayos se representa en la Fig. 3. Donde se puede apreciar que la nueva configuración *Square* es la más eficiente. Además se aprecia que para todas las configuraciones, en los valores altos de  $\Delta T_{w,a}$ , la potencia de las cocinas desciende mucho, no llegando a hervir el agua.

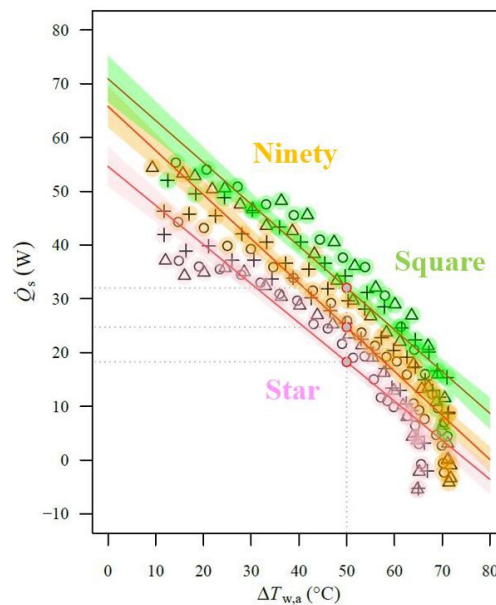


Fig. 3. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para una altura solar media de 34-35°.

El segundo grupo de ensayos se realizó en el mes de mayo con un ángulo de elevación del sol de 66-68°. La evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente de estos ensayos

se representa en la Fig. 4. En este caso se aprecia que las dos configuraciones propuestas son mejores que la original y que la más eficiente de las dos es la *Star*. En este rango de elevación del sol se aprecia también que las potencias obtenidas son mayores y que el agua llega a hervir.

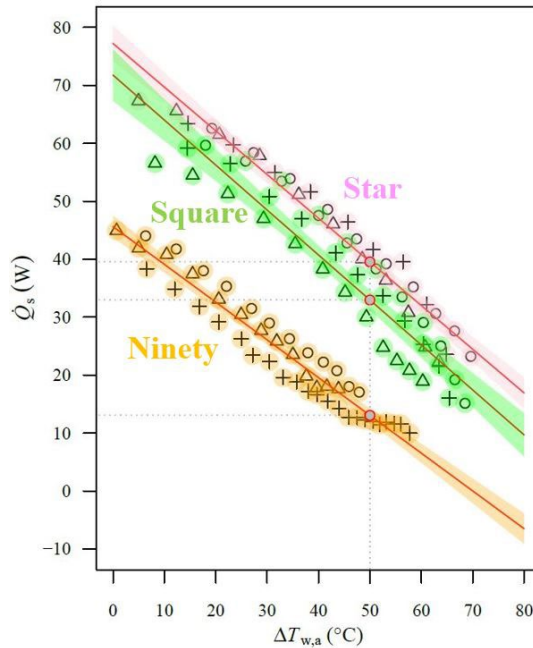


Fig. 4. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para una altura solar media de 66-68°.

El tercer grupo de ensayos se realizó en el mes de julio con un ángulo de elevación del sol de 72-75°. La evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente de estos ensayos se representa en la Fig. 5. En este caso las configuraciones estudiadas son las configuraciones de sol alto. Se puede apreciar que las dos configuraciones propuestas son mejores que la original. Al principio del ensayo cuando la elevación del sol es menor, se puede apreciar una leve superioridad de la configuración *Big Flower*, pero al final del ensayo esta mejora desaparece y las dos configuraciones se comportan de forma similar.

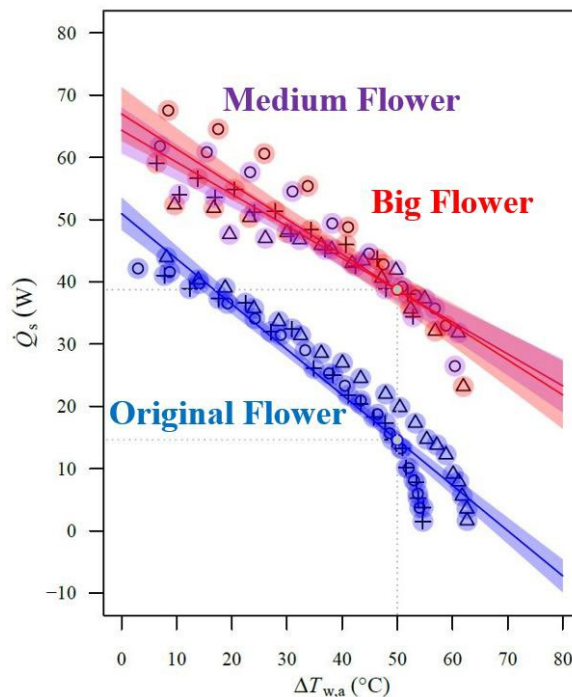


Fig. 4. Evolución de la potencia estandarizada en función del diferencial de temperatura entre el agua y el ambiente, para una altura solar media de 72-75°.

Para realizar una comparación global de todos los ensayos, se ha hecho la Tabla 1. Donde para las diferentes configuraciones y los diferentes grupos de ensayos se muestran los valores de la potencia estándar para  $\Delta T_{w,a}=50^{\circ}\text{C}$ , denominado  $\dot{Q}_{S,50}$ . También se representa la ganancia de cada configuración nueva respecto a la configuración original para esa elevación del sol.

Tabla 1. Resumen de los resultados de los diferentes grupos de ensayos.

Configuración	Ángulo de elevación del sol ( $^{\circ}$ )	$\dot{Q}_{S,50}$ (W)	Ganancia respecto a original(%)
<i>Flower (Original)</i>	72-75	14.6	-
<i>Medium Flower</i>	72-75	38.7	165.1
<i>Big Flower</i>	72-75	38.8	165.8
<i>Ninety (Original)</i>	66-68	13.1	-
<i>Star</i>	66-68	39.6	202.3
<i>Square</i>	66-68	33.0	151.9
<i>Ninety (Original)</i>	34-35	24.7	-
<i>Star</i>	34-35	18.3	-25.9
<i>Square</i>	34-35	32.0	29.6

Analizando la Tabla 1. Se puede ver que para ángulos de elevación del sol bajos la mejor configuración es la *Square* y que supone una mejora de un 29.6% respecto a la configuración original. Para elevación del sol media sin embargo la mejor configuración es la *Star*, donde la mejora respecto a la configuración original es un impresionante 202,3%. Por último, la configuración elegida para sol alto es la *Big Flower*. Esta configuración obtiene el mismo valor de  $\dot{Q}_{S,50}$  que la configuración *Medium Flower*, pero tiene un comportamiento mejor durante la primera fase del ensayo. Además la mejora de esta configuración respecto a la original es asimismo impresionante, de un 165.8%.

## CONCLUSIONES

Este trabajo ha estudiado de forma experimental variaciones de la geometría de la cocina solar Copenhagen, sin modificar ninguna de las piezas de la cocina solar, tan solo modificando los puntos de unión de las mismas. Se han definido tres nuevas configuraciones que permiten un aumento de potencia de 29.6% para elevación del sol baja, 202,3% para elevación media y 165,8% para elevación alta. Estos aumentos de potencia son muy importantes y permiten que en todo el rango estudiado, la cocina solar Copenhagen tenga una potencia estándar para  $\Delta T_{w,a}=50^{\circ}\text{C}$  de entre 32W y 39.6W, si se utiliza la mejor configuración en cada caso. Este aumento de potencia permite cocinar en todo el rango estudiado, no obstante en el caso de elevación solar baja no llega a hervir. Por ello, los autores creen que sería interesante desarrollar una cocina Copenhagen de tamaño mayor.

## REFERENCIAS/REFERÊNCIAS

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.

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>.