



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA: MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

Caracterización termo-óptica de la cocción solar en recipientes de vidrio tintado
Thermo-optical characterization of solar cooking in tinted glass containers

Realizado por
Jesús San Martín Perles
Tutorizado por
Antonio Carrillo Andrés (Universidad de Málaga)
Cotutorizado por
Xabier Apaolaza Pagoaga
Departamento
Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, 26/05/2025

Fecha defensa:
El Secretario del Tribunal

Quiero agradecerse a mis tutores, Antonio y Xabier, por confiar en mí y ayudarme a realizar un TFG un poco diferente.

Resumen:

En 2021, aproximadamente 2.300 millones de personas en el mundo seguían sin acceso a métodos de cocinado limpio, recurriendo al uso de combustibles tradicionales como la leña o incluso excrementos. Esta situación genera importantes problemas de salud, contaminación del aire interior y riesgos de seguridad, especialmente en comunidades vulnerables. Las cocinas solares se presentan como una herramienta eficaz para combatir la pobreza energética, ya que permiten cocinar alimentos o pasteurizar agua sin necesidad de combustibles fósiles o biomasa, utilizando únicamente la energía solar. Estos dispositivos funcionan captando y concentrando la radiación solar sobre un recipiente de cocción. Dentro de la variedad existente, las cocinas solares tipo panel destacan por ser las más accesibles y fáciles de construir. Están formadas por superficies reflectantes que dirigen la radiación hacia el recipiente, el cual suele estar cubierto por una envoltura transparente que actúa como trampa de calor para mejorar la eficiencia térmica. Generalmente, los recipientes empleados son ollas negras específicas, diseñadas para maximizar la absorción de radiación. Sin embargo, aunque su uso no resulta complejo, pueden no adaptarse bien a todo tipo de preparaciones culinarias o presentar limitaciones prácticas. Ante esto, se propone el uso de recipientes de vidrio tintado como alternativa. Estos son fáciles de conseguir, no requieren una gran inversión, y gracias a su geometría y propiedades térmicas, podrían ofrecer mejores resultados en la cocción. Además, su empleo podría contribuir a que un mayor número de personas adopte el uso de cocinas solares, al percibir las como dispositivos más versátiles y accesibles.

Abstract: In 2021, approximately 2.3 billion people in the world still lack access to clean cooking methods, resorting to the use of traditional fuels such as wood or even excreta. This situation creates significant health problems, indoor air pollution and safety risks, especially in vulnerable communities. Solar cookers are presented as an effective tool to combat energy poverty, as they allow cooking food or pasteurising water without the need for fossil fuels or biomass, using only solar energy. These devices work by capturing and concentrating solar radiation on a cooking vessel. Among the existing variety, solar panel cookers stand out for being the most accessible and easy to build. They consist of reflective surfaces that direct the radiation towards the recipient, which is usually covered by a transparent envelope that acts as a heat trap to improve thermal efficiency. Generally, the containers used are specific black pots, designed to maximise radiation absorption. However, although they are not complex to use, they may not be well suited to all types of culinary preparations or have practical limitations. In view of this, the use of tinted glass containers is proposed as an alternative. These are readily available, do not require a large investment and, thanks to their geometry and thermal properties, could offer better cooking results. In addition, their use could contribute to the adoption of solar cookers by more people, as they are perceived as more versatile and accessible devices.

Índice de contenidos

1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivo y Metodología	2
1.3. Estructura del Trabajo	2
2. Cocinas Solares	3
2.1. Modelos Principales	3
2.1.1. Cocinas Tipo Caja	3
2.1.2. Cocinas de Tubo de Vacío	5
2.1.3. Cocinas Parabólicas	7
2.1.4. Cocinas con Paneles Reflectantes	8
2.2. Aspectos clave de diseño	10
2.2.1. Reflectores	10
2.2.2. Recipiente	11
2.2.3. Trampa de calor	15
3. Caracterización de los recipientes de vidrio tintado	17
3.1. Descripción	17
3.2. Caracterización espectral	19
3.3. Modelo de ray tracing	24
4. Ensayos experimentales	29
4.1. Método de cálculo	30
4.1.1. Definición de variables y unidades	30
4.1.2. Preprocesado de datos	31
4.1.3. Procesado de datos	31
4.2. Comparativa de recipiente oscuro y olla negra	32
4.2.1. Ensayo N ^o 1	33
4.2.2. Ensayo N ^o 2	38
4.3. Ensayos con comida desatendida	41
4.3.1. Ensayo N ^o 3	42
4.4. Análisis de resultados	44
5. Conclusiones	45
5.1. Futuras líneas de trabajo	45
A. Tablas	47
A.1. Ensayo N ^o 1	47
A.2. Ensayo N ^o 2	50
A.3. Ensayo N ^o 3	54

ÍNDICE DE CONTENIDOS

B. Fichas técnicas	57
C. Puesta en práctica	59
Bibliografía	63

CAPÍTULO 1

Introducción y Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado para el título de Ingeniería de la Energía en la Universidad de Málaga estudia el comportamiento de cocinas solares tipo panel utilizando recipientes de vidrio tintado como receptor. Por lo general, en las cocinas solares de paneles se utilizan recipientes metálicos, opacos y oscuros, típicamente ollas. Este recipiente suele colocarse dentro de una trampa de calor, construida con una cobertura transparente, que puede ser de vidrio o de plástico. A pesar de que sustituir la olla metálica negra por vidrio tintado supone en principio una reducción de la potencia útil que llega a la comida, dado que la absorción de la radiación no es tan favorable, también tiene algunas ventajas. Por un lado, es un recipiente de muy bajo coste y fácil disponibilidad, ya que se puede construir fácilmente a partir de botellas normales como las que se utilizan para la cerveza o el vino. Por otro lado, es muy difícil quemar la comida con un recipiente de este tipo, ya que las superficies tienden a no calentarse tanto como en el caso de tener superficies metálicas negras. Por tanto, se adaptan muy bien al estilo de cocina solar desatendida, que requiere muy poca supervisión por parte del usuario. Finalmente, su geometría permite colocar varios recipientes a la vez en un único reflector, y completar diversos tipos de comida simultáneamente, si así se desea.

1.1. Antecedentes

Las cocinas solares han existido durante siglos; la primera de ellas data del año 1767, cuando el científico Horace-Bénédict de Saussure diseñó un dispositivo conocido como la *caja caliente*". Sin embargo, hoy en día, siguen siendo instrumentos relativamente poco conocidos y utilizados. Es importante aclarar que el uso de las cocinas solares varía según la realidad social de cada país. En regiones donde las cocinas convencionales son un lujo, las cocinas solares son muy útiles y ampliamente utilizadas. En cambio, aunque son herramientas útiles e interesantes desde el punto de vista energético y medioambiental, su adopción en países desarrollados continúa siendo limitada. En estos contextos, su uso suele estar asociado más a un pasatiempo, actividad educativa o experimentación tecnológica, que a una necesidad real. Esto se debe a que, en comparación con las cocinas convencionales, presentan ciertas desventajas funcionales: requieren mayor tiempo de cocción, una planificación previa, y es necesario reorientarlas periódicamente para seguir la trayectoria solar, lo que dificulta su integración en la rutina diaria de muchas personas. Para promover su adopción, no deben competir directamente con las cocinas convencionales. En su lugar se deben resaltar sus fortalezas y comodidades, haciendo que su uso sea más atractivo para un público más amplio.

Tradicionalmente, las cocinas solares utilizan como recipiente un modelo de olla negra metálica estandarizada. Sin embargo, este presenta ciertas limitaciones en su uso en cuanto a versatilidad

y resultados de ciertas elaboraciones. Este estudio tiene como objetivo principal la caracterización termo-óptica de recipientes de vidrio tintado para su uso en cocinas solares como alternativa viable a las ollas negras. Además, se presenta también la idea de un método de cocinado desatendido, que, con el uso de los nuevos recipiente, busca transformar el cocinado solar en una experiencia mucho más cómoda e integrada en la rutina diaria de un mayor número de usuarios.

1.2. Objetivo y Metodología

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización termo-óptica de los recipientes de vidrio tintado con el fin de evaluar su viabilidad como alternativa a las ollas negras metálicas tradicionalmente utilizadas en cocinas solares. Para ello se analizarán parámetros relevantes como la transmisividad del vidrio y su comportamiento en ensayos de ebullición de agua, pasando por comparativas con el comportamiento de las ollas. El propósito final de esta investigación es mejorar y facilitar la experiencia de uso de las cocinas solares, proponiendo soluciones más accesibles y funcionales, que contribuyan a ampliar su uso por parte de un público más diverso. Se busca así que estas tecnologías, además de sostenibles, resulten más prácticas e integrables en la vida cotidiana.

Para ello se seguirá la siguiente metodología:

1. Se realizará un estudio bibliográfico sobre los principales modelos de cocinas solares: tecnologías, geometría, funcionamiento, etc.
2. Se caracterizará el vidrio del que están compuesto los recipientes.
3. Se lanzarán y analizarán distintos ensayos para poder llevar a cabo el estudio deseado.
4. Se plantearán futuras líneas de trabajo además de mostrar casos más prácticos sobre el uso de este tipo de metodología.

1.3. Estructura del Trabajo

El trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 1: introducción, en la que se contextualizará el trabajo y se fijarán los objetivos y la metodología.
- Capítulo 2: cocinas solares. En él se describen los principales modelos y su funcionamiento, además de aspectos claves en el diseño.
- Capítulo 3: caracterización de los recipientes de vidrio, donde se conocerán sus parámetros clave.
- Capítulo 4: método de cálculo y ensayos experimentales.
- Capítulo 5: posibles líneas futuras.
- Capítulo 6: se muestran algunos ejemplos de cocinados reales.

CAPÍTULO 2

Cocinas Solares

La energía solar es una de las principales fuentes de energía renovables de las que disponemos. Esta puede ser aprovechada de muchas formas, y una de ellas, aunque no tan conocida, es a través de las cocinas solares.

Las cocinas solares son instrumentos que aprovechan la energía solar para así poder cocinar alimentos sin la necesidad de utilizar una fuente de calor convencional. Hay distintos modelos muy variados y con diferentes formas de aprovechar la energía solar, pero si hay algo que tienen en común es que su funcionamiento se basa en la captación de radiación solar.

Dependiendo del modelo que utilicemos, la radiación se aprovechará en mayor o menor medida, siendo más convenientes algunos modelos que otros si se considera la localización geográfica. Además, cuando hablamos de cocinas solares, hay tres aspectos de diseño muy importantes que decidirán el buen o mal funcionamiento de nuestra cocina, los reflectores, el recipiente y la trampa de calor. Esto no significa que para que una cocina solar funcione correctamente necesite de la combinación de estos tres elementos, pero si que es bueno tenerlos en cuenta a la hora de utilizar una.

2.1. Modelos Principales

Como ya se ha mencionado antes, cuando hablamos de cocinas solares hay muchos modelos [5] donde elegir. Para ello lo primero es entender en qué se basa el funcionamiento de cada una.

2.1.1. Cocinas Tipo Caja

Las cocinas tipo caja [12], como su nombre indica, consisten en una caja aislada térmicamente con una tapa transparente, generalmente de vidrio, para permitir la entrada de los rayos del sol. Por dentro, esta cocina está pintada de negro para absorber mejor la radiación, es por esto que tienen un funcionamiento más similar al de un horno.

Estas cocinas pueden usar paneles de concentración o no, dependiendo de esto, serán capaces de aprovechar la radiación que les llega en mayor o menor medida. Cuando la cocina se utiliza sin los paneles, la cocina no es tan sensible al estar algo desorientada con respecto al sol, sin embargo, una correcta orientación siempre favorecerá un mejor funcionamiento. Aunque la falta de reflectores hace que la cocina tenga menos área efectiva de captación, por lo que capta menos radiación, dependiendo del uso que se le quiera dar, puede ser una opción interesante.

En las figuras 2.1 y 2.2, se muestran las cocinas tipo caja con y sin reflectores, respectivamente.



Figura 2.1: Cocina solar tipo caja con reflectores



Figura 2.2: Cocina solar tipo caja sin reflectores

A continuación en la figura 2.3 se muestran dos cocinas tipo caja abiertas.



Figura 2.3: Cocina solar tipo caja abierta

2.1.2. Cocinas de Tubo de Vacío

Como su nombre indica, las cocinas de tubo de vacío como la de las figuras 2.4 y 2.5 utilizan tubos de vidrio doble con un vacío entre las dos capas, el cual actúa como excelente aislante térmico, minimizando las pérdidas de calor. Normalmente, estas cocinas usan adicionalmente reflectores parabólicos o planos para concentrar más luz solar sobre el tubo. Estos reflectores dirigen la radiación solar hacia el tubo interior, aumentando aún más la cantidad de energía captada. Dependiendo del diseño de los reflectores, será necesario reorientar la cocina en mayor o menos medida.



Figura 2.4: Cocina solar Tubo de Vacío abierta



Figura 2.5: Cocina solar Tubo de Vacío

Estas cocinas tienen una tecnología muy interesante, pueden alcanzar altas temperaturas y

reparten el calor de manera homogénea, sin embargo, suelen ser considerablemente más caras, frágiles, y difíciles de transportar. Además, debido a su forma, sus usos pueden verse más reducidos en comparación con el resto de modelos.

2.1.3. Cocinas Parabólicas

Las cocinas parabólicas [16] aprovechan su geometría para focalizar en una zona toda la radiación que reciben. Por su geometría, podemos encontrar parabólicas cuyo punto focal este más o menos adelantado con respecto al disco parabólico. En las figura 2.6 y 2.7 podemos ver un de ejemplo donde el punto focal está más cerca del disco y otro donde está más lejos, respectivamente.



Figura 2.6: Cocina solar parabólica con foco cercano



Figura 2.7: Cocina solar parabólica con foco alejado

Las cocinas parabólicas ofrecen altas potencias debido a ser capaces de concentrar toda la radiación que reciben en un mismo punto. Esto le da ventajas en cuanto a otros modelos cuando se busca velocidad. Sin embargo, deben mantener siempre una correcta orientación con el sol, ya que, de no ser así, es muy sencillo que dejen de concentrar la radiación en el punto deseado.

2.1.4. Cocinas con Paneles Reflectantes

Al igual que las cocinas parabólicas, las cocinas con paneles reflectantes [14] buscan reorientar los rayos solares para concentrar la radiación en un punto. La diferencia entre ambas está en que, en este caso, este tipo de cocinas no focalizan de forma tan precisa la radiación. Dentro de las cocinas que utilizan este sistema, hay distintos también distintos modelos según su geometría. Al igual que otros modelos, estas cocinas también requieren ser reorientadas periódicamente para aprovechar al máximo la radiación solar. Sin embargo, no son tan sensibles a la orientación como las cocinas parabólicas, ya que al concentrar menos la radiación, toleran un mayor margen de desviación sin perder eficacia.

Dentro de este grupo podemos destacar las cocinas tipo embudo [11], [6] o las copenhague [3], [2], [13], [4]. La diferencia entre estas reside en su geometría, la cual hará que los rayos del sol se reflejen de una forma o de otra.

La cocina copenhague la podemos ver en la figura 2.8, su geometría se basa en la unión de paneles reflectantes flexibles, pudiendo usar distintas configuraciones para así adaptarse mejor a cada momento, a diferencia de la cocina parabólica, en este modelo, no todos los rayos se reflejan directamente al recipiente. Hay rayos solares que se reflejan fuera de la cocina, otros que reflejan al recipiente directamente, y muchos otros que reflejan hasta dos y tres veces entre las paredes de la cocina hasta llegar al recipiente.



Figura 2.8: Cocina solar Copenhaguen

Por último, las cocinas tipo embudo como la de la figura 2.9, tienen un funcionamiento muy similar al de las copenhaguen, solo que con una geometría distinta.



Figura 2.9: Cocina solar tipo embudo

A continuación, se explican los aspectos fundamentales que afectan al buen funcionamiento de una cocina solar y por qué ha sido este último modelo el elegido para el estudio.

2.2. Aspectos clave de diseño

2.2.1. Reflectores

Los reflectores son superficies utilizadas para redirigir la radiación solar hacia un punto específico, generalmente el área donde se encuentra el recipiente de cocción. Por ello, tanto la forma de la cocina solar como la geometría de los reflectores constituyen un aspecto constructivo esencial. Asimismo, el material empleado en su fabricación influye considerablemente, ya que existen superficies con distintos niveles de reflectividad que afectan directamente la eficiencia del sistema. En el caso de la cocina tipo embudo, sus reflectores son paneles rectos ensamblados entre sí de tal forma que son capaces de cumplir con la función de redireccionar los rayos solares. Para comprender mejor su geometría se ha realizado un diseño 3D del modelo con sus principales cotas, el cual se muestra en la figura 2.10

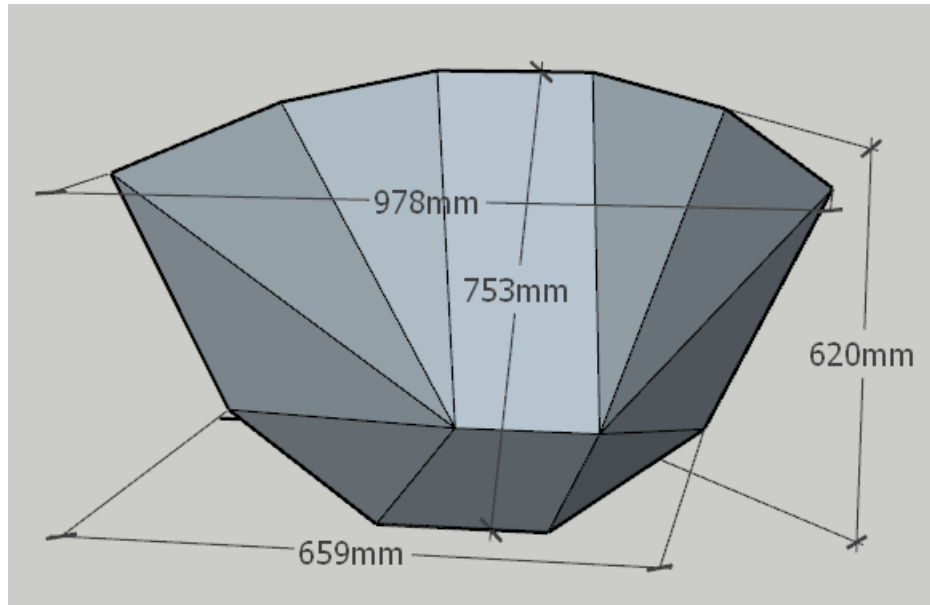


Figura 2.10: Diseño 3D de la cocina tipo embudo

Como se puede ver, la apertura de la cocina es de aproximadamente 1 metro de longitud, tiene área de captación de 0.5 m^2 y permite la rotación en los planos horizontal y vertical, lo que facilita un mejor seguimiento solar.

2.2.2. Recipiente

El recipiente también cumple una función clave en el rendimiento de la cocina solar. A diferencia de los reflectores, su objetivo es absorber y retener la mayor cantidad posible de radiación solar para convertirla en calor y así cocinar los alimentos. Esto se logra mediante el uso de superficies oscuras, las cuales presentan una mayor capacidad de absorción térmica en comparación con las claras. Además, deben considerarse otros aspectos prácticos como la facilidad de uso, limpieza y resistencia del recipiente. Típicamente, el recipiente más utilizado es una olla negra metálica y ligera como la que aparece en las figuras 2.11 y 2.12.



Figura 2.11: Olla negra metálica



Figura 2.12: Olla negra metálica abierta

Sin embargo, existen numerosos tipos, con diferentes materiales y geometría cada uno, como por ejemplo los que se muestran en las figuras 2.13.



Figura 2.13: Frascos de vidrio



Figura 2.14: Tetera



Figura 2.15: Recipiente oscuro

El recipiente utilizado en este estudio se analiza con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

2.2.3. Trampa de calor

La trampa de calor representa un componente fundamental en muchas cocinas solares, aunque algunos modelos prescinden de ella. Su principal función es conservar el calor dentro del sistema, aumentando la eficiencia energética al minimizar las pérdidas por convección con el aire exterior. Gracias a este mecanismo, se puede mantener una temperatura más constante durante el proceso de cocción. La trampa de calor puede estar compuesta de distintos materiales y geometrías como los distintos ejemplos que muestra la figura 2.16, incluso pudiendo utilizar una bolsa de plástico transparente como en el modelo R4.

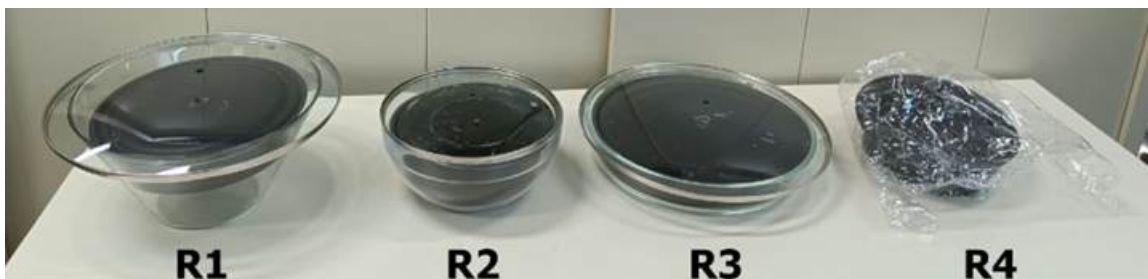


Figura 2.16: Trampas de calor

Fuente: Tomado de Tomassetti (2025). Experimental characterization of a panel solar cooker with adjustable geometry for sun tracking. Renewable Energy. Elsevier.

Debido a que su principal función es la de minimizar la pérdidas de calor, su composición puede ser variada, siempre y cuando permita contener al recipiente que se utilice.

CAPÍTULO 3

Caracterización de los recipientes de vidrio tintado

3.1. Descripción

Como ya se ha mencionado antes, los recipientes de vidrio tintado han sido obtenidos a partir de botellas de litro, típicamente utilizadas para almacenar bebidas como la cerveza. Estas son económicas y fáciles de adquirir, por lo que son las elegidas para este estudio. Para fabricar los recipientes, se utiliza un cortador de vidrio que, mediante una cuchilla, realiza una marca en la botella por donde se efectuará el corte. Posteriormente, se aplica un cambio brusco de temperatura para separar el vidrio y obtener así el recipiente deseado. Los recipientes tienen una capacidad aproximada de 0.5 litros y su peso en mojado es de 288.1 gramos, tal y como muestran las figuras 3.1 y 3.2.

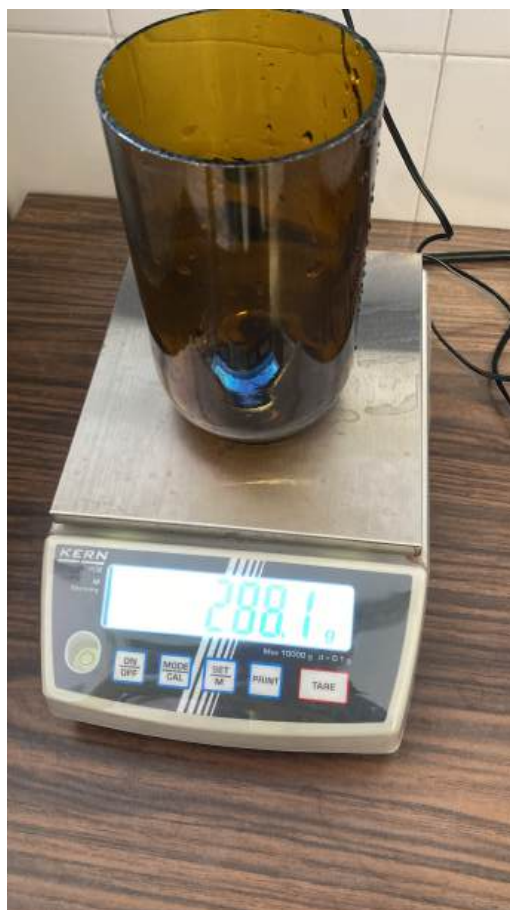


Figura 3.1: Recipiente vacío

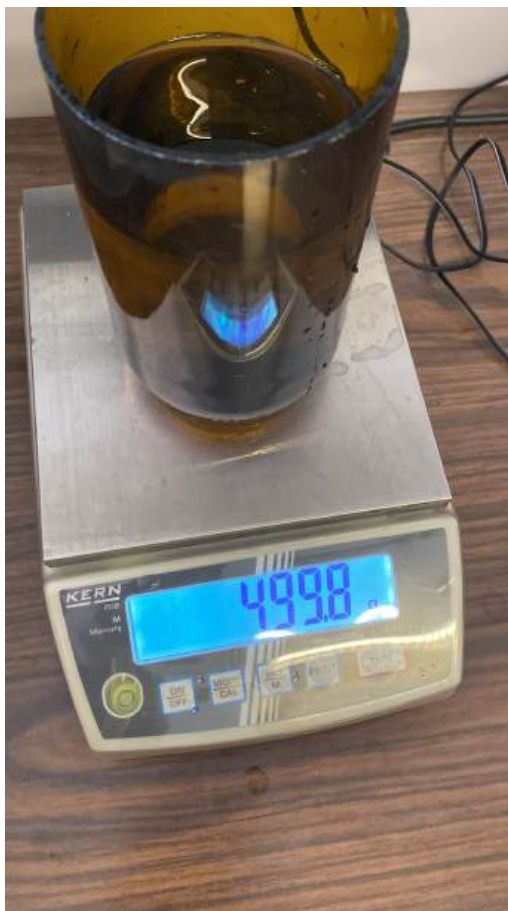


Figura 3.2: Recipiente con carga

3.2. Caracterización espectral

Se ha realizado un análisis espectral del vidrio utilizando un espectroradiómetro, como el que se muestra en la figura 3.3, con el objetivo de determinar qué parte del espectro visible es capaz de atravesarlo. Concretamente el modelo utilizado es el EKO MS-711, cuya ficha técnica se puede encontrar en el Anexo II.



Figura 3.3: Espectroradiómetro

La medición fue realizada el 31 de enero de 2025 en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industriales, latitud 36.71° y longitud -4.49° . El método llevado a cabo consiste en situar el vidrio sobre el espectroradiómetro y realizar la medición, como se observa en la figura 3.4.



Figura 3.4: Medición del espectro que deja pasar el vidrio

Se han medido tanto el espectro que es capaz de atravesar el vidrio, como el espectro total, es decir, sin ningún vidrio. En la figura 3.6 se muestra espectro total que es capaz de medir el espectroradiómetro, el cual fue medido a las 10:44:11, mientras que la 3.5 muestra el espectro capaz de pasar a través del vidrio, medido a las 10:45:36.

EKO WISER

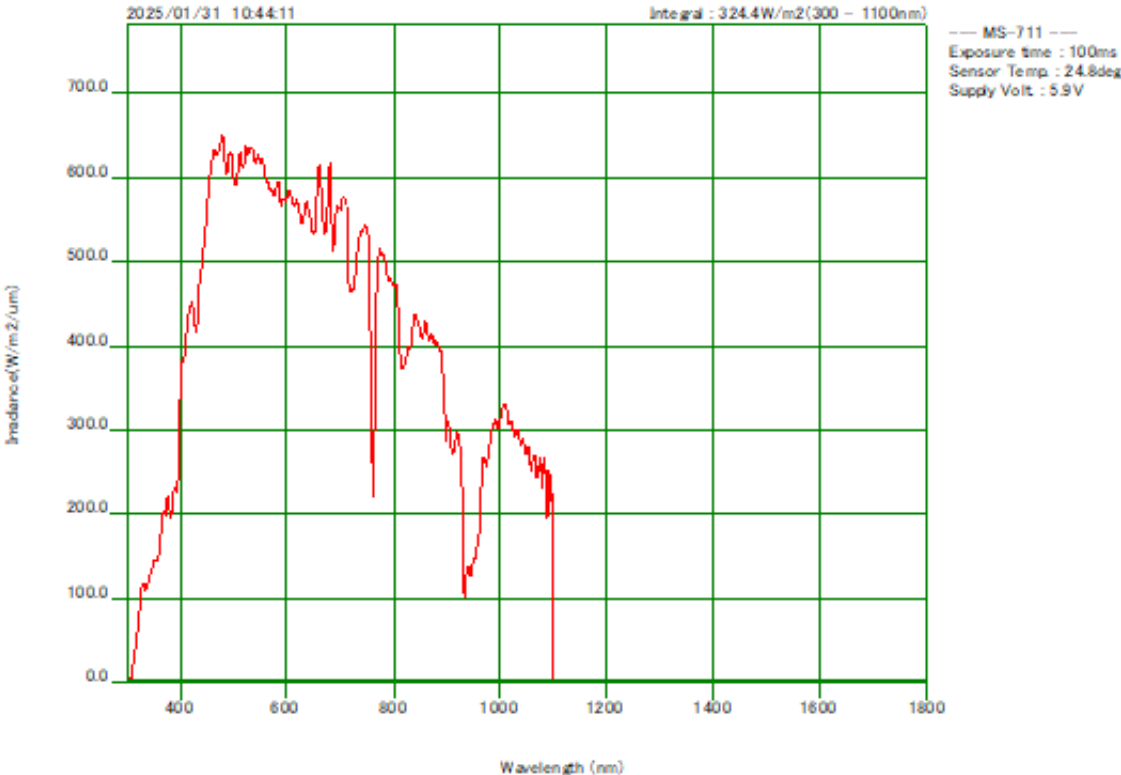


Figura 3.5: Espectro total

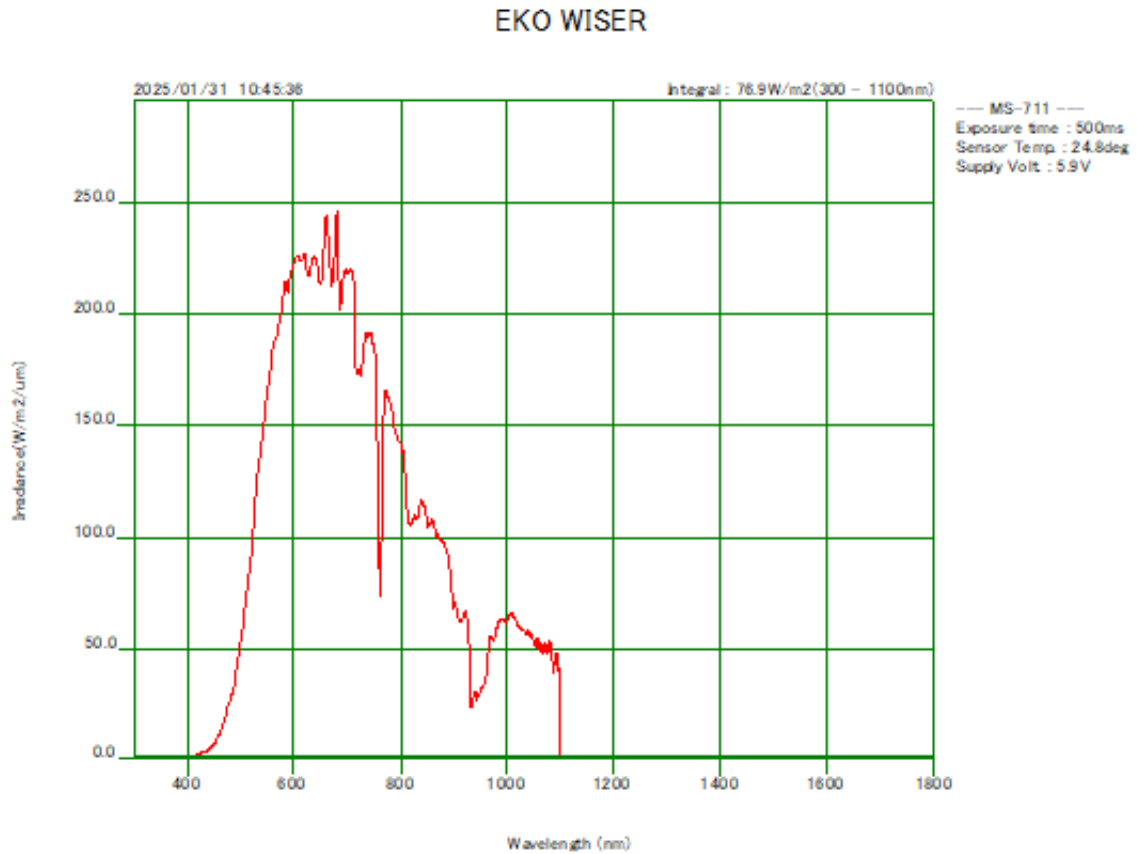


Figura 3.6: Espectro que pasa a través del vidrio

Para poder realizar una mejor comparación de ambos espectros se han representado en la figura 3.7.

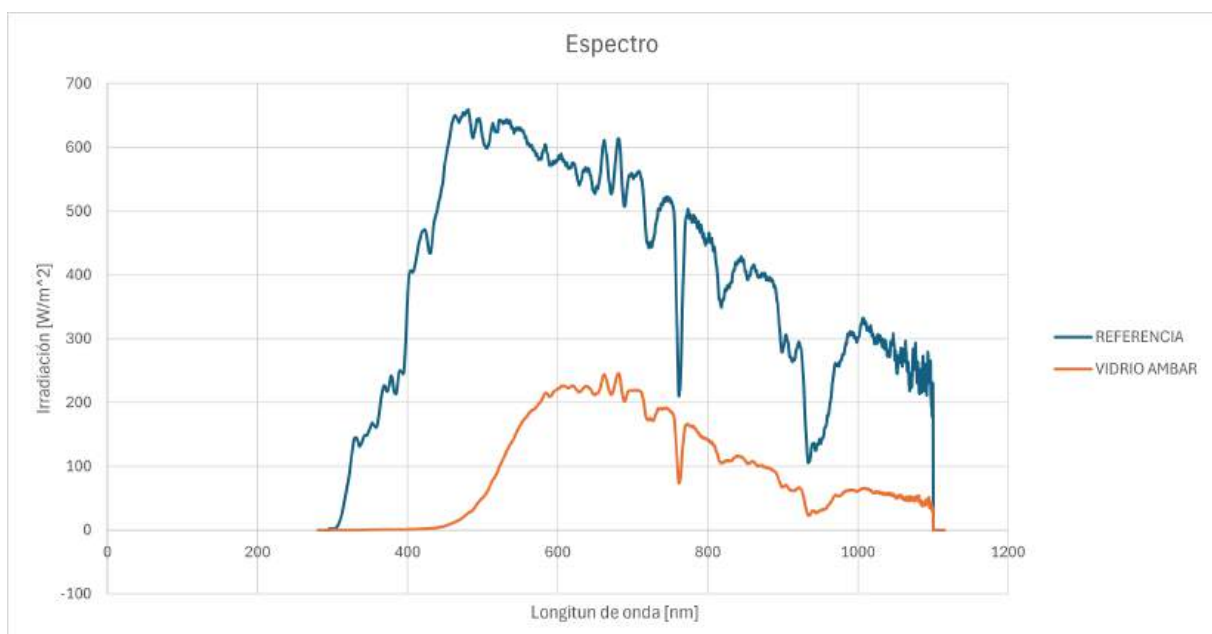


Figura 3.7: Comparativa de ambos espectros

Además, también se ha representado las transmisividad del vidrio frente a la longitud de onda en la figura 3.8.

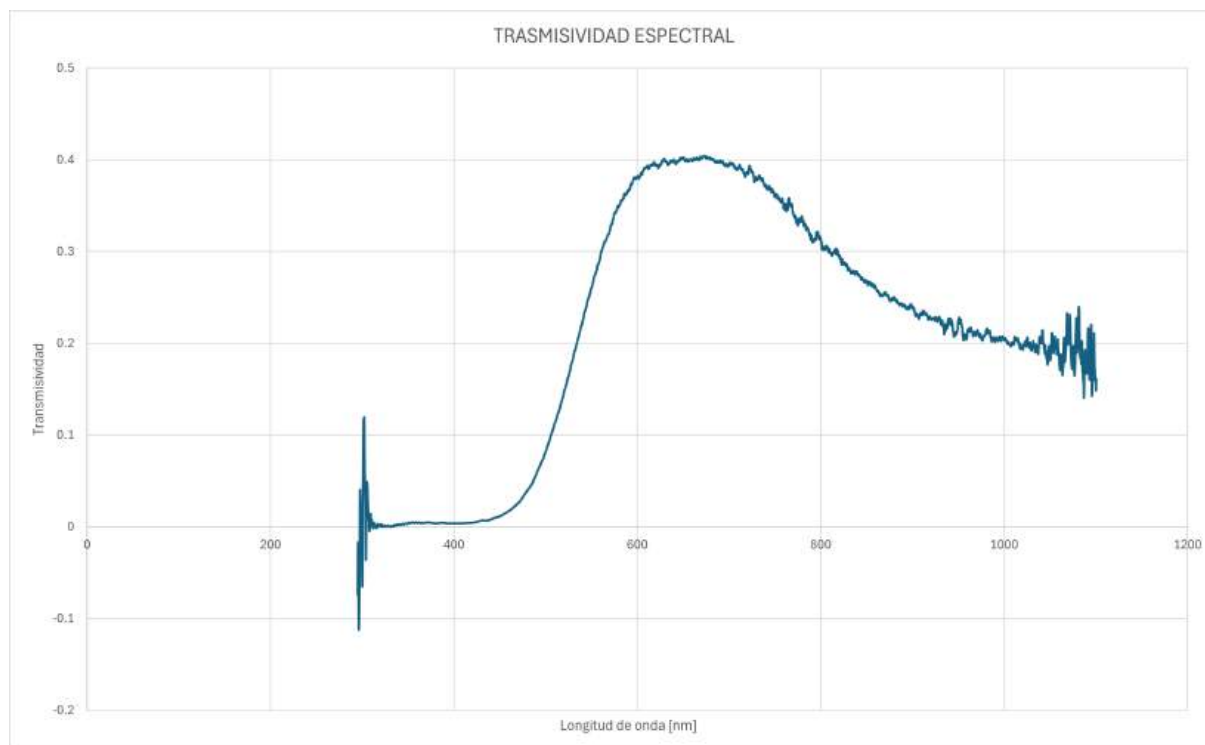


Figura 3.8: Transmisividad del vidrio

El vidrio tintado filtra la banda hasta los 400 nm, lo que significa que es capaz de filtrar la parte ultravioleta del espectro total, característica que protege a los alimentos de su degradación, lo que hace que sea una gran opción para cocinar en él. De los 400 nm a los 600 nm tiene un elevado aumento de la transmisividad, siendo de 0.4 hasta los 700 nm. A partir de aquí comienza la parte infrarroja y vuelve a bajar hasta 0.3 en los límites de medición del espectroradiómetro que están a partir de los 1000 nm.

Al integrar esta última curva, se obtiene la transmisividad global del vidrio, la cual es de 0.25. Esto que significa que tiene una absorptividad de 0.75, un valor que en la práctica puede ser más elevado si se cuenta con que los rayos del sol pasarían por el vidrio al entrar y al salir, además de que si el recipiente cuenta con alimentos en su interior, estos también aumentarían la absorptividad global del recipiente.

3.3. Modelo de ray tracing

Para reproducir el escenario del experimento y estimar así la transmisividad global del vidrio, se ha empleado el software SolTrace [15], [10], [7], [9], [8]. Este software permite simular el trazado de los rayos solares en sistemas ópticos mediante técnicas de ray tracing. En este caso se ha modelado el recipiente de vidrio con el objetivo de estudiar la distribución solar sobre su superficie.

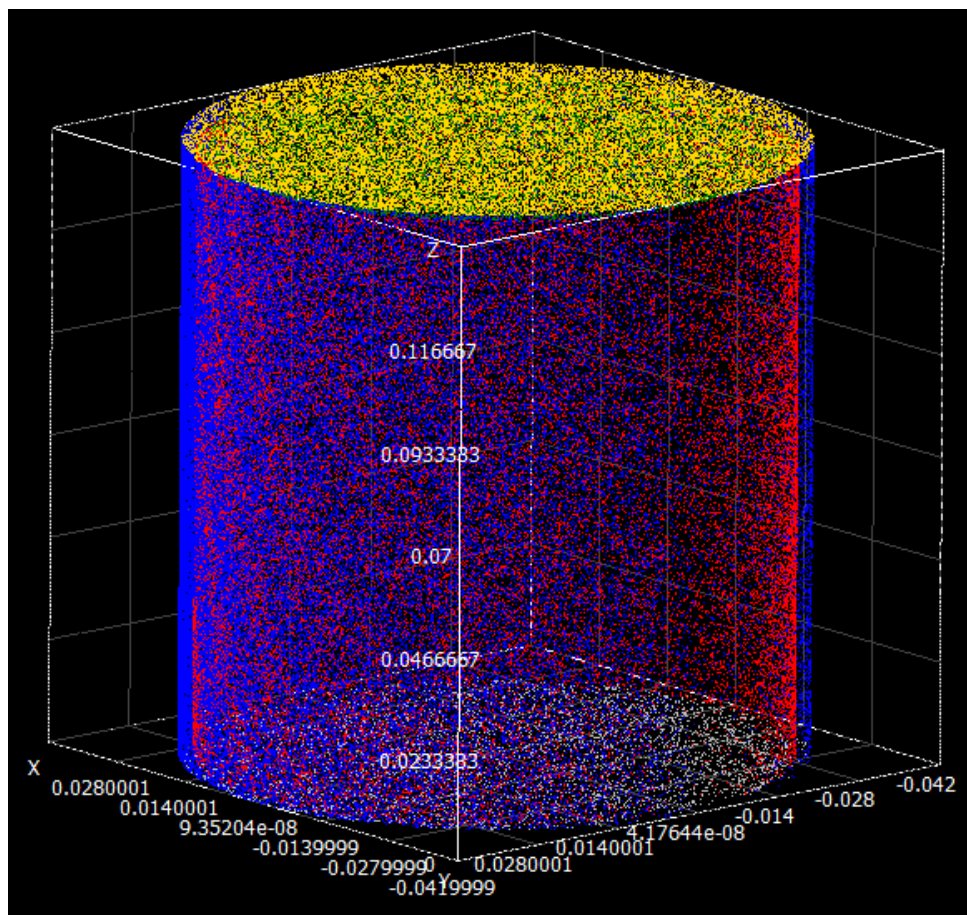


Figura 3.9: Modelo del recipiente de vidrio en SolTrace

En la figura 3.9 se muestra lo que se acaba de mencionar. En ella se pueden ver las dos caras del vidrio, y en la figura 3.10 se muestran además algunos de los rayos que impactan en el recipiente.

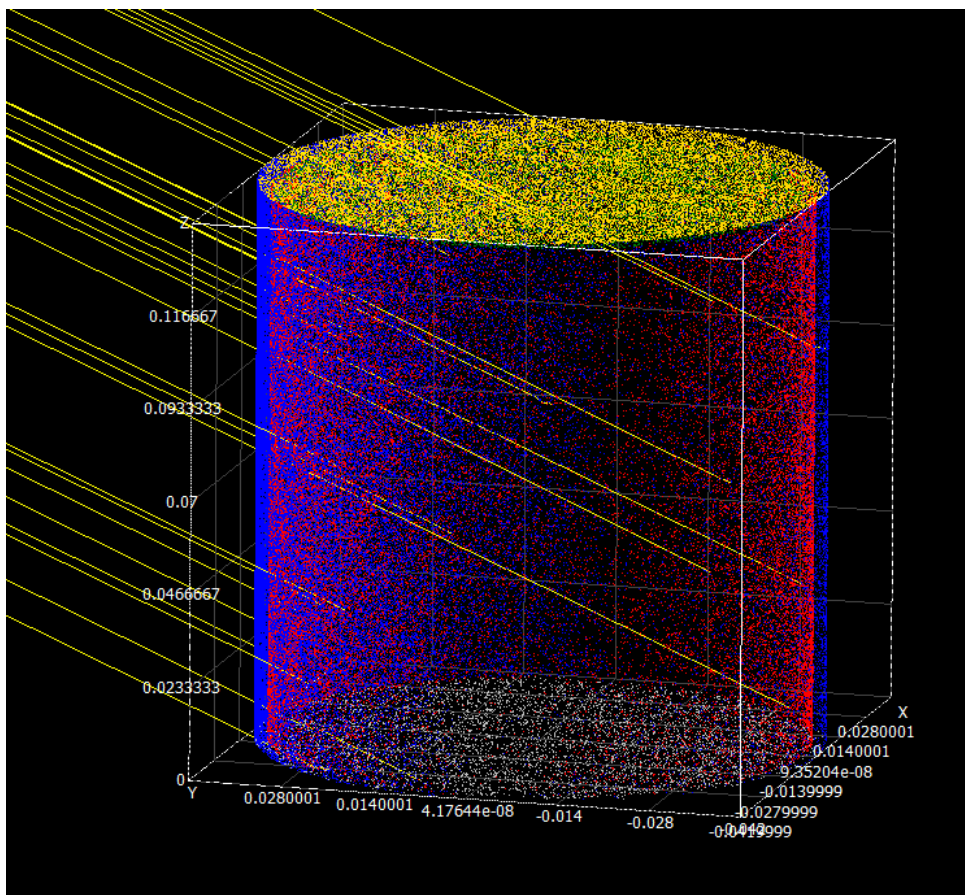


Figura 3.10: Visualización de los rayos sobre el recipiente

Si nos fijamos bien en esta última figura, se puede ver como los rayos que atraviesan el vidrio sufren un cambio en su trayectoria, esto es debido a la refracción del vidrio, la cual genera este efecto. En la figura 3.11 se ha ampliado la figura 3.10 para contemplarlo mejor.

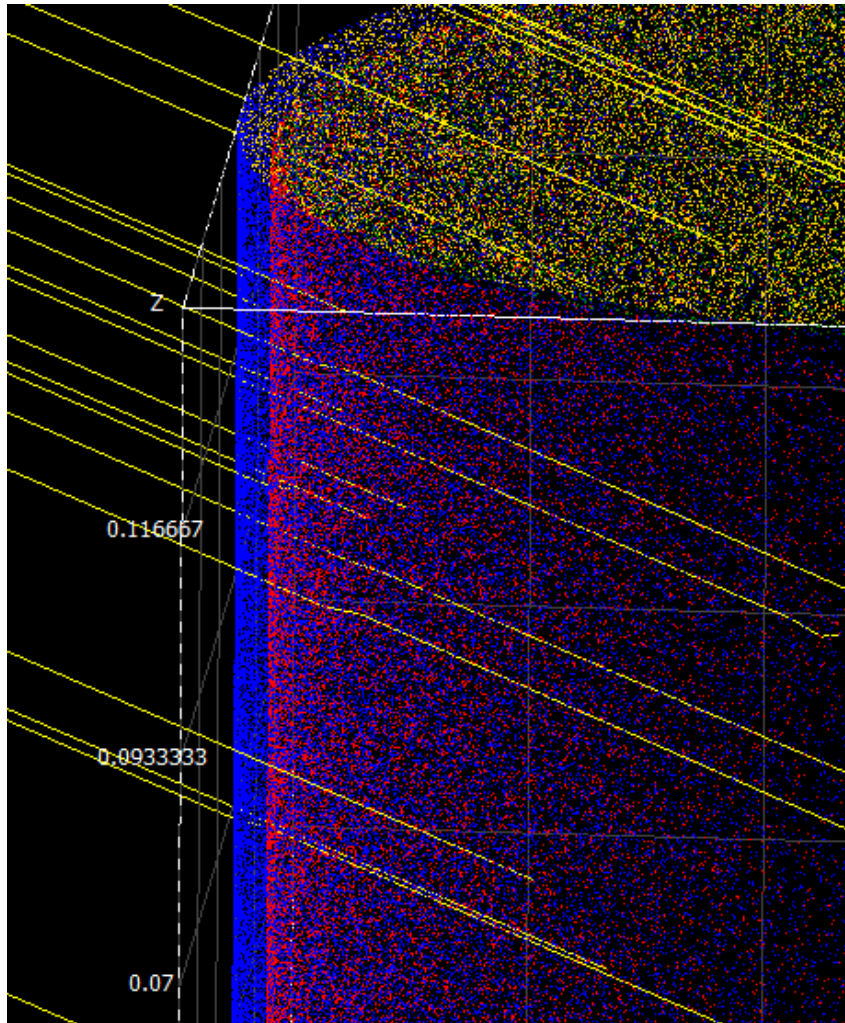


Figura 3.11: Refracción de los rayos al atravesar el vidrio

CAPÍTULO 4

Ensayos experimentales

Todos los ensayos recogidos en este capítulo han sido realizados en la azotea de la Escuela de Ingenierías Industrial, utilizando cocinas con geometría tipo embudo e inclinación de 30° con respecto al suelo. Los ensayos han consistido en caracterizar el proceso de calentamiento de agua hasta la ebullición en los nuevos recipientes propuestos. Los datos de temperatura del fluido han sido tomados a través de un termopar, como el de la figura 4.1, y el software HOBOWare. Se han realizado dos tipos de ensayos diferentes, por un lado, se ha comparado el comportamiento de la olla metálica frente al recipiente de vidrio tintado, y por otro lado, se ha estudiado el funcionamiento de estos nuevos recipientes en el caso de no reorientar la cocina con el paso del tiempo.



Figura 4.1: Termopar

4.1. Método de cálculo

Antes de realizar los ensayos experimentales, se debe explicar el método de cálculo [1] llevado a cabo para el análisis de los datos medidos. Durante los ensayos se miden datos sobre la temperatura del fluido que hay en los recipientes, a través del termopar, y datos atmosféricos como la radiación incidente y temperatura ambiente medidos por la estación meteorológica de la escuela.

4.1.1. Definición de variables y unidades

En este apartado se recogen y explican las variables utilizadas en el método de cálculo, concretamente en la tabla 4.1.

Símbolo	Descripción	Unidades
Q	Potencia útil	W
V	Volumen de carga	L
Cp_w	Calor específico del agua	J/Kg-°C
T_f	Temperatura final del intervalo	°C
T_i	Temperatura inicial del intervalo	°C
t_i	Tiempo del intervalo	s
DNI	Irradiación directa normal	W/m ²
I_{tn}	Irradiación directa normal en un instante dado	W/m ²
R_b	Radiación directa	W/m ²
θ_z	Angulo cenital solar	Deg
Eff	Eficiencia de la cocina	[-]
A_{ap}	Área de apertura	m ²
Pot	Potencia normalizada	W

Tabla 4.1: Variables utilizadas en el cálculo

4.1.2. Preprocesado de datos

Antes de procesar los datos, se deben retocar y unir los datos para poder trabajar con ellos. La estación meteorológica realiza las medidas cada 30 segundos, mientras que el termopar toma los datos cada 1 minuto, por lo que lo primero es homogeneizar los datos con ayuda de ficheros python. Lo primero que hacen convertir los datos meteorológicos a intervalos de 1 minuto. Los datos medido por el termopar también deben ser preprocesados para poder leerlos. Una vez ambos ficheros están listos, se unen en un único fichero de excel, donde están listos para poder seguir con el análisis.

4.1.3. Procesado de datos

Para trabajar mejor con los datos se han agrupado en intervalos de 5 minutos. La potencia útil de la cocina se obtiene a partir del salto de temperaturas del intervalo tal y como muestra la ecuación 4.1.

$$Q = V * Cp_w * (T_f - T_i)/t_i \quad (4.1)$$

La I_{tn} se calcula como la media del intervalo de la DNI, la cual se calcula según la ecuación 4.2.

$$DNI = \frac{R_b}{\cos(\theta_z)} \quad (4.2)$$

Para el cálculo de la potencia normalizada, primero se necesita obtener la eficiencia de la cocina, la cual se puede expresar con la ecuación 4.3.

$$Eff = \frac{Q}{A_{ap} * I_{tn}} \quad (4.3)$$

Y una vez obtenida la eficiencia, la ecuación 4.4 nos permite obtener la potencia normalizada para cada intervalo de tiempo.

$$Pot = Eff * 850 * A_{ap} \quad (4.4)$$

El objetivo de estos ensayos es caracterizar el proceso de calentar agua, en una cocina solar, utilizando los recipientes de vidrio tintado.

4.2. Comparativa de recipiente oscuro y olla negra

Estos ensayos seguirán la norma para así tener una idea del comportamiento de los recipientes oscuros. Se ha elegido una olla negra como comparativa ya que es un recipiente que está totalmente normalizado y del que se conoce muy bien su funcionamiento

El método [1] a seguir será el siguiente:

En un día claro se colocan ambas cocinas simultáneamente con la misma orientación e inclinación. En una sitúa la olla negra con tapa transparente y un litro de agua, mientras que en la otra, los dos recipientes de vidrio oscuro con medio litro de agua cada uno, tal y como se puede ver en las figuras 4.3 y 4.2 respectivamente.



Figura 4.2: Cocina con recipientes



Figura 4.3: Cocina con Olla

4.2.1. Ensayo N^o 1

Este ensayo ha sido realizado el 12 de julio de 2024, comenzando a las 11:45 y finalizando a las 13:00. Como se ha mencionado previamente, se han colocado simultáneamente las dos cocinas orientadas al sol. En el momento en que alguna de las cocinas logre hervir el agua (en el caso de las cocinas con recipientes, ambos recipientes deben alcanzar la ebullición), esa cocina será girada para evitar que siga captando radiación solar y se dará por finalizada la toma de datos correspondiente. La cocina con los recipientes está situada de tal forma que en la posición sur se encuentra el recipiente con tapa morada, y en la posición norte el recipiente con tapa verde, tal y como muestran las figuras 4.4 y 4.5.



Figura 4.4: Olla negra con tapa transparente



Figura 4.5: Recipientes norte y sur

En los ensayos con reorientación es conveniente realizar estos ajustes cada 20/30 minutos. Para este ensayo se han realizado las siguientes revisiones:

- **1º Revisión: 12:05** Pasado el tiempo se revisaron las cocinas, sin embargo, no se realizó ninguna reorientación ya que no fue necesario. Esto se debe a que en el tramo horario en el que se ha realizado el ensayo, el sol varía de altura solar pero no tanto de azimut.
- **2º Revisión: 12:30.** El agua de la olla negra ya ha roto a hervir, por lo que se ha girado la cocina dando por finalizada la toma de datos de esta. La cocina con los recipientes ha sido reorientada levemente.
- **3º Revisión: 12:50.** El recipiente norte ha comenzado a hervir, pero el recipiente sur aún no, por lo que se ha vuelto a reorientar.
- **4º Revisión: 13:05.** Esta vez se ha revisado antes de tiempo debido a que al recipiente sur le quedaba poco para hervir. A esta hora ambos recipientes ha alcanzado la ebullición, por lo que se ha dado por finalizado el experimento.

Tras haber procesado los datos que se han obtenido del ensayo siguiendo el método del capítulo anterior, se han realizado una serie de representaciones para poder llevar a cabo la comparación entre la olla negra y los recipientes de vidrio oscuro.

Lo primero es representar la radiación incidente durante el ensayo, la cual se muestra en la figura 4.6.

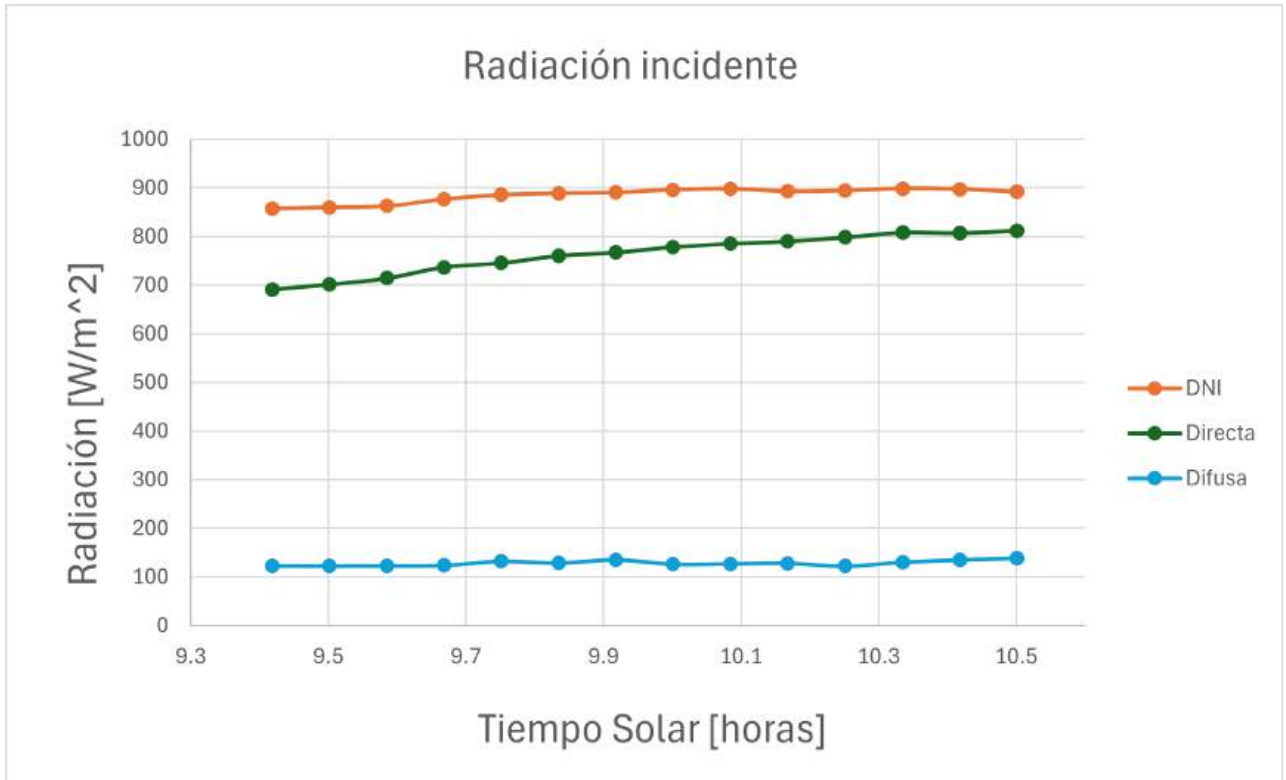


Figura 4.6: Radiación frente al tiempo

El día en que se realizó el ensayo se alcanzaron niveles de entre 800 y 900 W/m^2 . Se han representado también la evolución de las temperaturas en los distintos recipientes, además de la potencia útil que alcanza cada uno, en las gráficas 4.7 y 4.8, respectivamente.

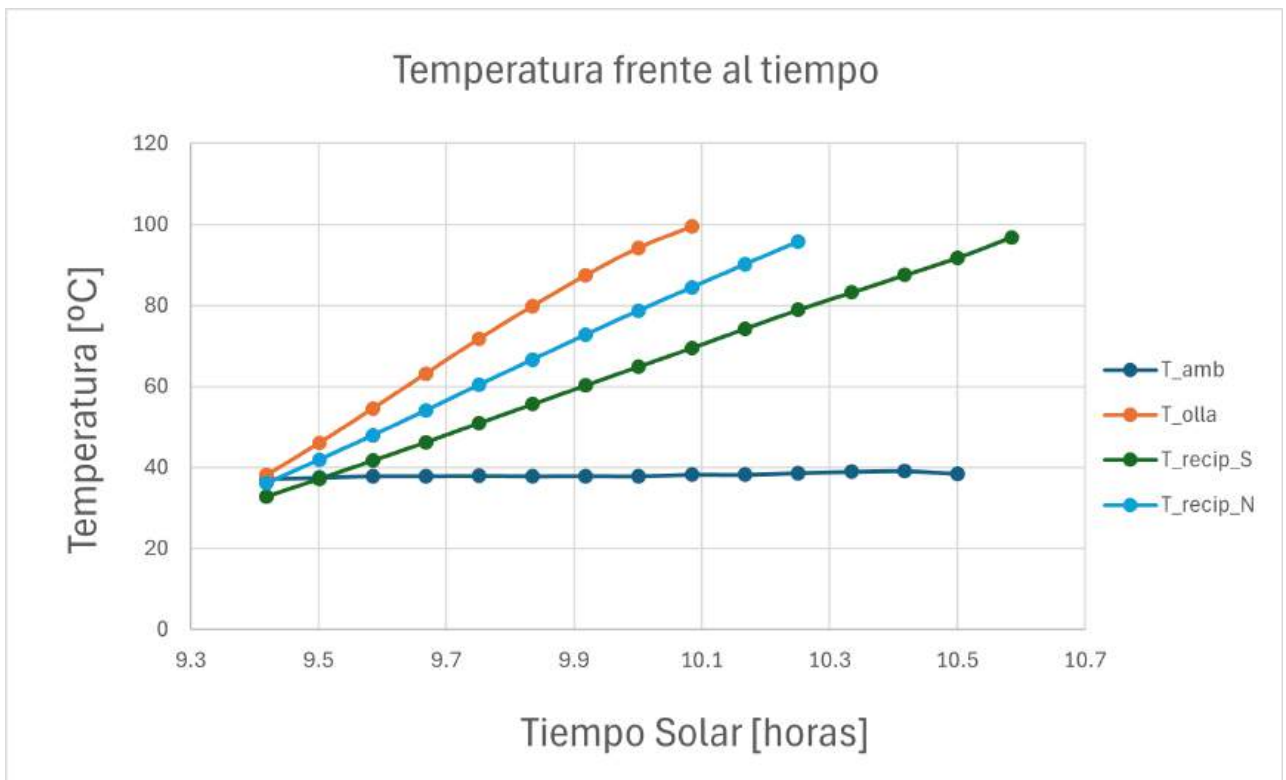


Figura 4.7: Temperaturas frente al tiempo

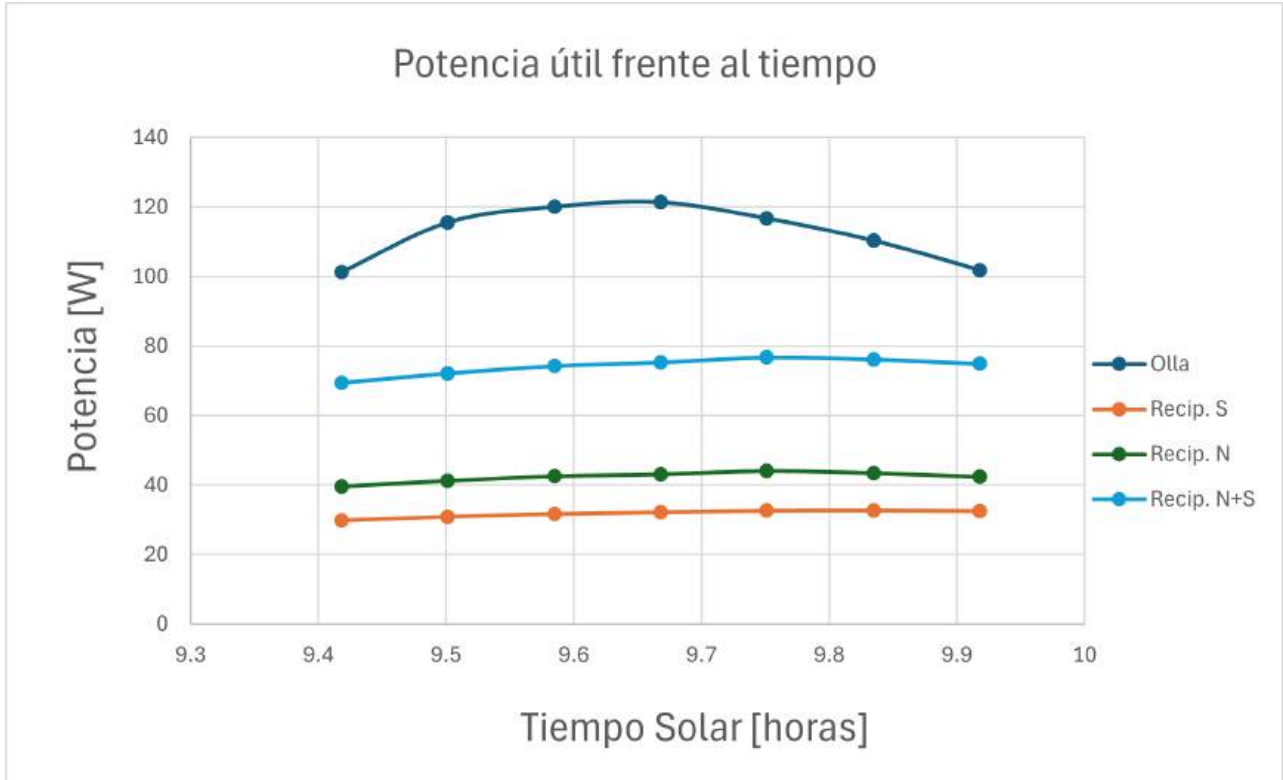


Figura 4.8: Potencia útil frente al tiempo

Si se observa la figura de las temperaturas, se observa claramente como la olla negra es la primera en alcanzar el punto de ebullición, en un tiempo total de 45 minutos, resultado esperado al conocer muy bien su buen funcionamiento. Por otro lado, el recipiente situado en la posición norte ha sido más rápido que el que está situado en la posición sur, tardando el recipiente norte tan solo 10 minutos más que la olla y el sur otros 15 minutos más, este resultado también tiene sentido y era esperado. Al conocer bien la geometría de la cocina, se sabe que en la posición norte acaban llegando más rayos que en la posición sur, es decir, hay una mayor concentración de radiación en esa zona, por lo que era de esperar que un recipiente allí situado, lograra alcanzar primero la ebullición. Es por esto que en la figura 4.8 se ven resultados similares, donde la olla ofrece los valores más elevados de potencia útil. De igual forma, el recipiente norte alcanza valores mayores que el recipiente sur, siendo la suma de estos de unos 70 W de potencia relativamente constantes a lo largo de todo el ensayo, lo que es muy útil si se busca un cocinado suave y constante. Por otro lado, en el caso de la olla si se ve una oscilación del valor de la potencia a lo largo del ensayo, presentando una un crecimiento de esta en la fase inicial y un decremento en la fase final. Esto es debido a que en un primer momento se está empleando parte de la energía en calentar el propio metal de la olla. En el momento que esta comienza a caer es debido a las pérdidas de calor a través de las paredes metálicas de la olla que no están en contacto con el agua. Los valores de temperatura y potencia han sido recogidos en las tablas A.1 y A.5, respectivamente, las cuales se encuentran en el Anexo I.

Este tipo de cocinas aprovechan prácticamente solo la radiación directa que incide sobre ellas, por lo que para la representación de la potencia normalizada de la figura 4.9, se ha usado una DNI de 850 W/m².

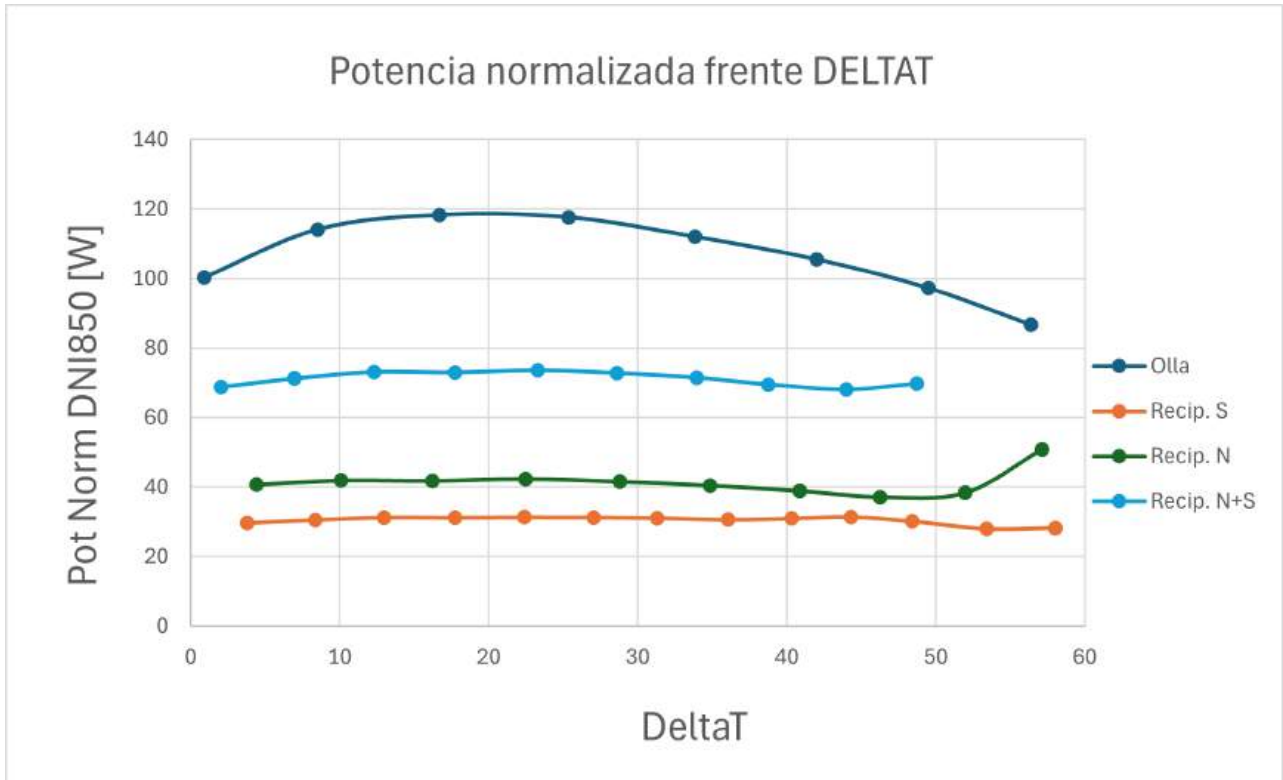


Figura 4.9: Potencia normalizada frente a deltaT

En esta figura se muestra algo similar a lo que se veía en la figura 4.8, donde la olla presenta una curva ascendente al comienzo y decreciente al final, alcanzando un pico de potencia de unos 120 W aproximadamente. Mientras, los recipientes en su conjunto alcanzan del orden de los 70 W de una manera mucho más estable. No obstante, se puede ver cómo la curva de potencia del recipiente norte, presenta un crecimiento en su último punto, esto puede ser debido a que por la geometría más alargada de los recipientes, en comparación con la olla, se forme una estratificación térmica en la que en la parte inferior, donde está situado el sensor de temperatura, tarda más en hervir el agua. Esto provoca que en un instante concreto, se mezcle rápidamente y quede registrado como una subida brusca de temperatura. En la realidad, seguramente la potencia se siguió manteniendo estable hasta el final del ensayo.

Al igual que antes, estos datos quedan recogidos en la tabla ?? del Anexo I.

En este punto ya se pueden sacar unas primeras conclusiones, y es que, si se tiene en cuenta la duración total de un cocinado, la diferencia entre los tiempos para hervir agua puede no ser demasiado significativa. Además, se debe tener en cuenta que, por la geometría y composición de los recipientes de vidrio, el cocinado es más suave y constante, algo que viene muy bien para la premisa de poder cocinar de manera desatendida.

4.2.2. Ensayo N^o 2

Este ensayo ha sido realizado el 16 de julio de 2024, comenzando a las 11:05 y finalizando a las 12:50. El método llevado a cabo es exactamente el mismo que en el Ensayo N^o 1 del apartado 4.2.1. También se ha utilizado la misma disposición para los recipientes de vidrio tintado. Realizándose las siguientes revisiones a lo largo del ensayo:

- **1^o Revisión: 11:30** No se realizó ninguna reorientación al no ser necesaria. Esto se debe a que en el tramo horario en el que se ha realizado el ensayo, el sol varía de altura solar

pero no tanto de azimut.

- **2º Revisión: 12:00.** Se reorientaron levemente ambas cocinas.
- **3º Revisión: 12:20.** La cocina con la olla negra rompió a hervir, fin de la toma de datos de la misma. El recipiente norte también estaba hirviendo, pero esta cocina continuó hasta hervir el recipiente sur.
- **4º Revisión: 12:40.** Pequeña reorientación de la cocina con los recipientes de vidrio.
- **5º Revisión: 13:05.** Ambos recipientes estaban hirviendo, por lo que se dio por finalizado el ensayo.

Al igual que en ensayo anterior, lo primero que se ha representado es la radiación incidente en la figura 4.10.

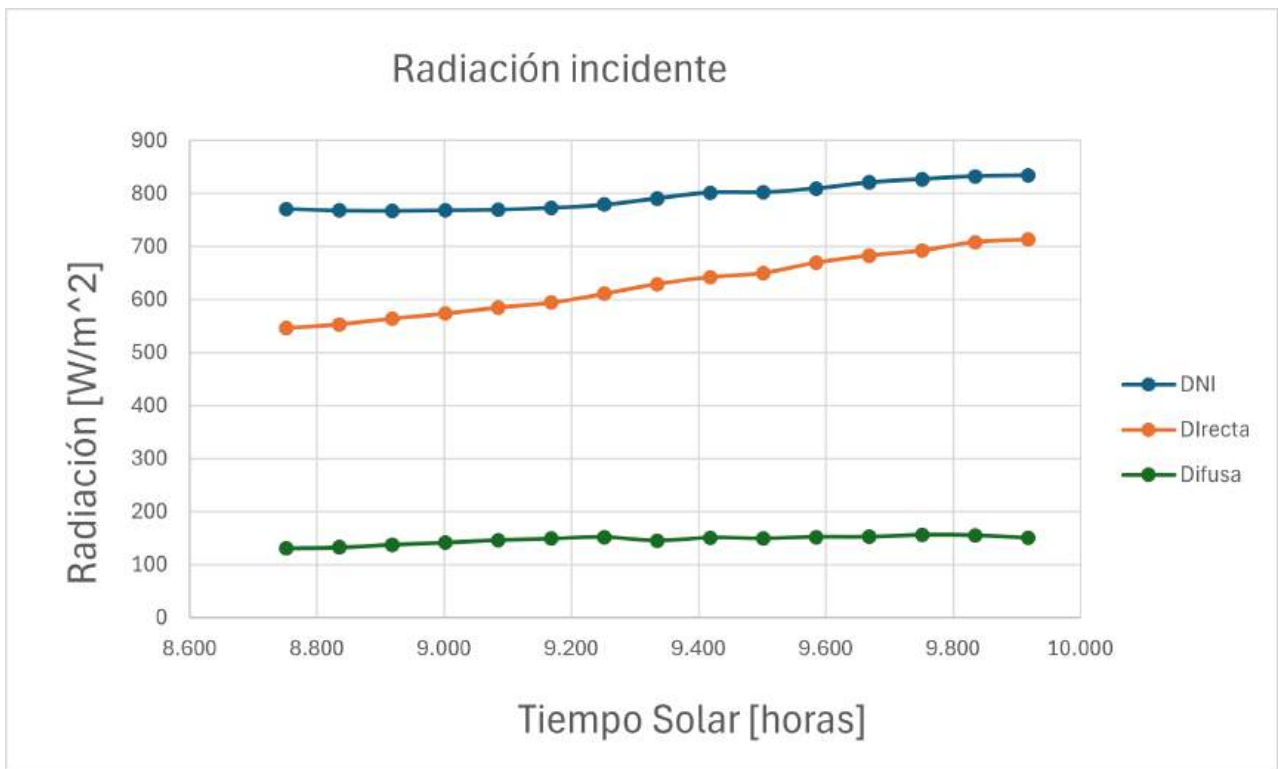


Figura 4.10: Radiación frente al tiempo

En este ensayo la radiación alcanzó niveles de entre 750 y 850 W/m². La evolución de las temperaturas y la potencia útil a lo largo del ensayo se han representado en las figuras 4.11 y 4.12.

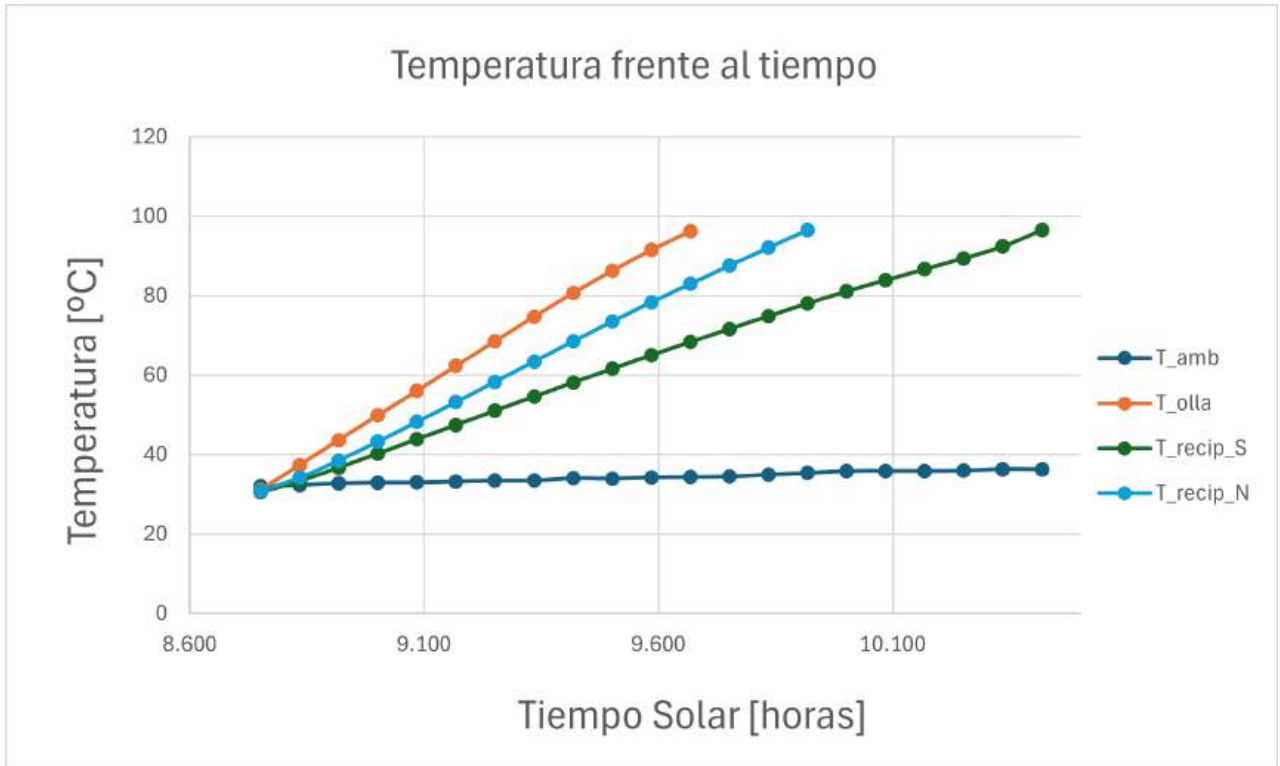


Figura 4.11: Temperaturas frente al tiempo

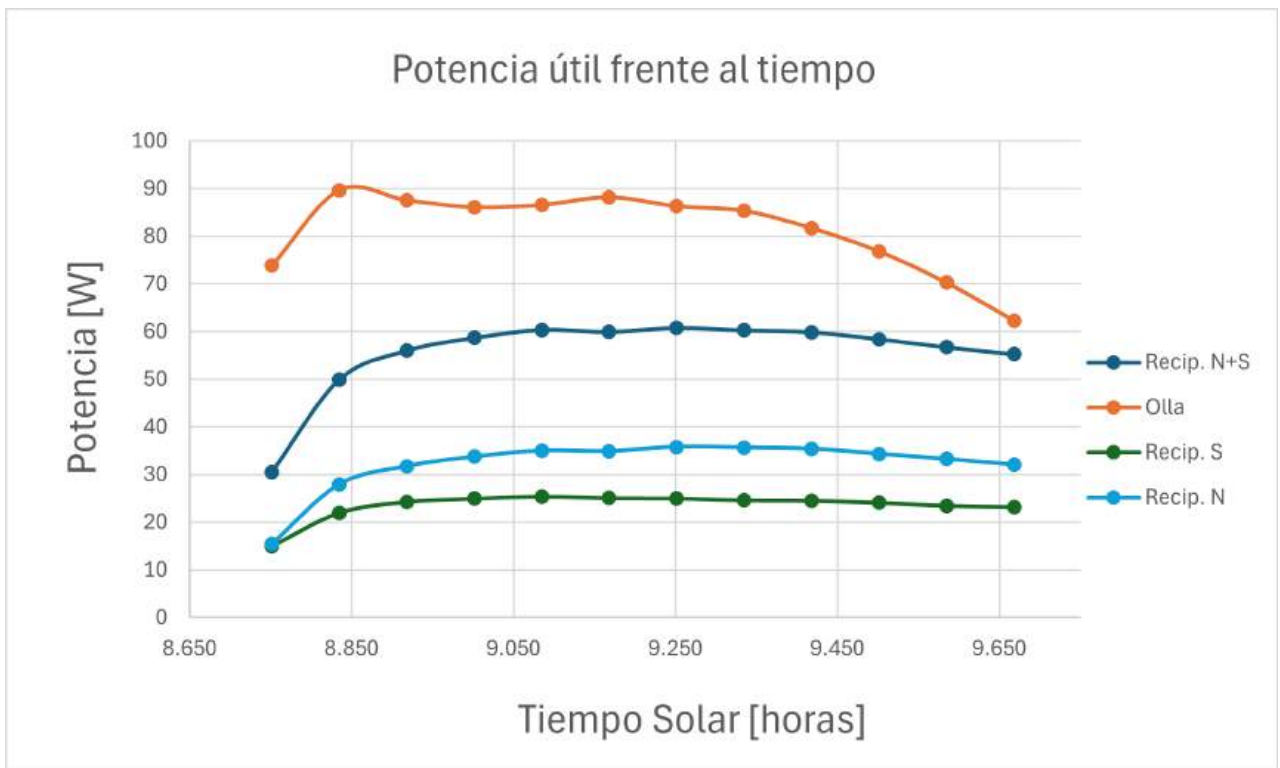


Figura 4.12: Potencia útil frente al tiempo

En este ensayo también se ha representado la potencia normalizada frente a la variación de temperatura entre el fluido y el ambiente en la figura 4.13.

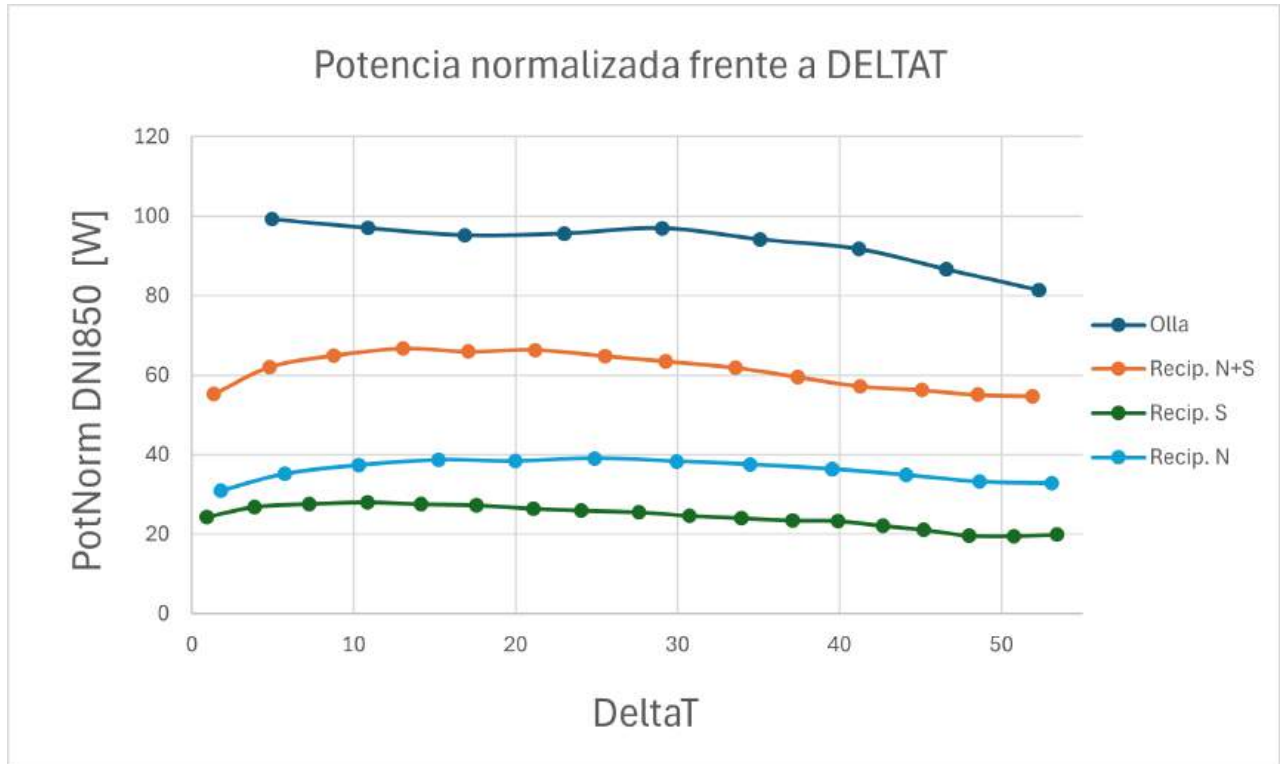


Figura 4.13: Potencia normalizada frente a deltaT

Estas figuras muestran nuevamente el comportamiento característico que se ha descrito en el ensayo anterior.

4.3. Ensayos con cocida desatendida

En este ensayo, en vez de seguir la norma, se busca estudiar la viabilidad de utilizar las cocinas solares con los recipientes de vidrio tintado, pero esta vez de forma desatendida, lo que quiere decir que no se realizarán reorientaciones de las cocinas a lo largo del ensayo. Con esto se busca establecer un método de cocinado más cómodo que no requiera atención y que proporcione buenos resultados, de forma que su integración en la rutina diaria pudiera ser más viable. Para ello en estos ensayos se va a caracterizar el proceso de calentamiento de agua hasta la ebullición, y el tiempo que se mantienen a esta temperatura, para simular de esta manera lo que sería un cocinado. Las cocinas se colocan con una orientación fija en adelante al sol de 60° al sureste con respecto al sur, tal y como muestra la figura 4.14.



Figura 4.14: Cocina desatendida

4.3.1. Ensayo N^o 3

Este ensayo ha sido realizado el 19 de julio de 2024, comenzando a las 10:25 y finalizando a las 13:20. Como ya se ha mencionado, el método llevado a cabo consiste en establecer una orientación antes de comenzar el ensayo, y que esta sea fija a lo largo del mismo. Es por esto que al contrario de los ensayos anteriores, no es necesario realizar revisiones periódicas.

La radiación incidente se ha representado en la figura 4.15

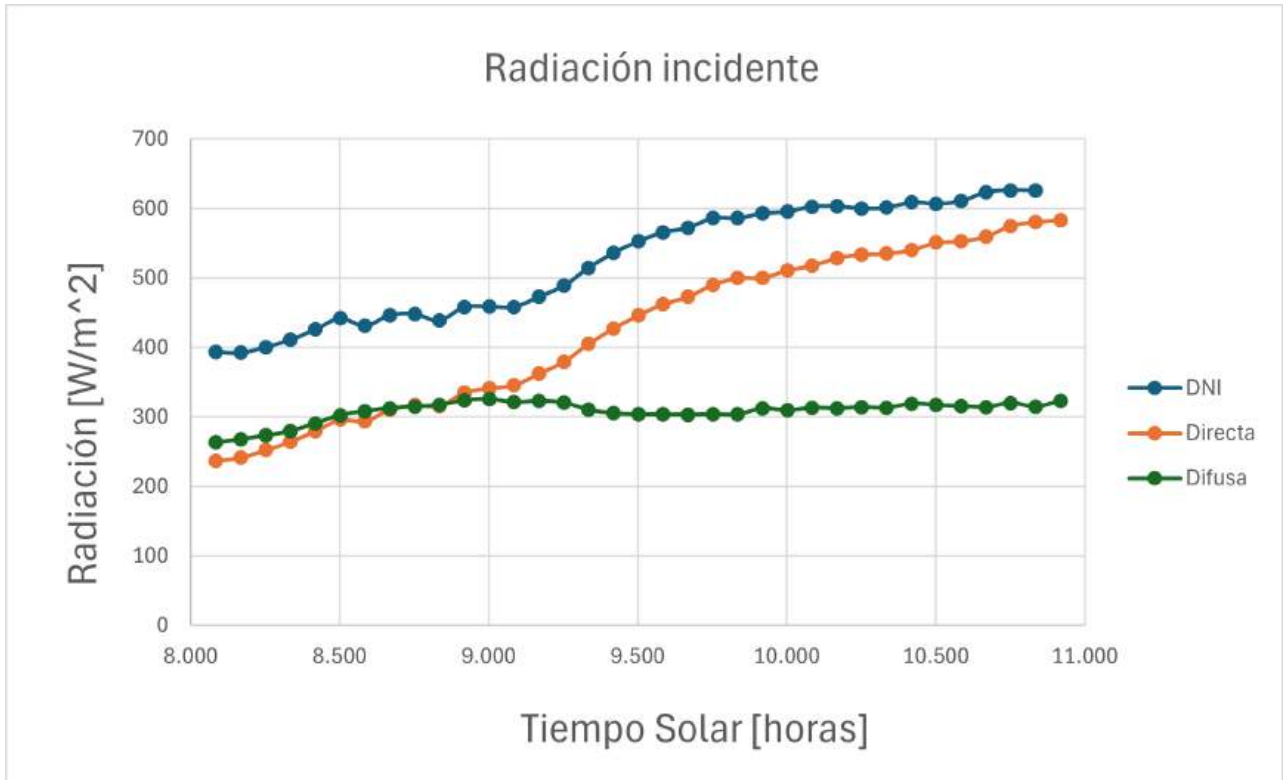


Figura 4.15: Radiación frente al tiempo

Al representar la distribución de temperaturas se obtiene la figura 4.16.

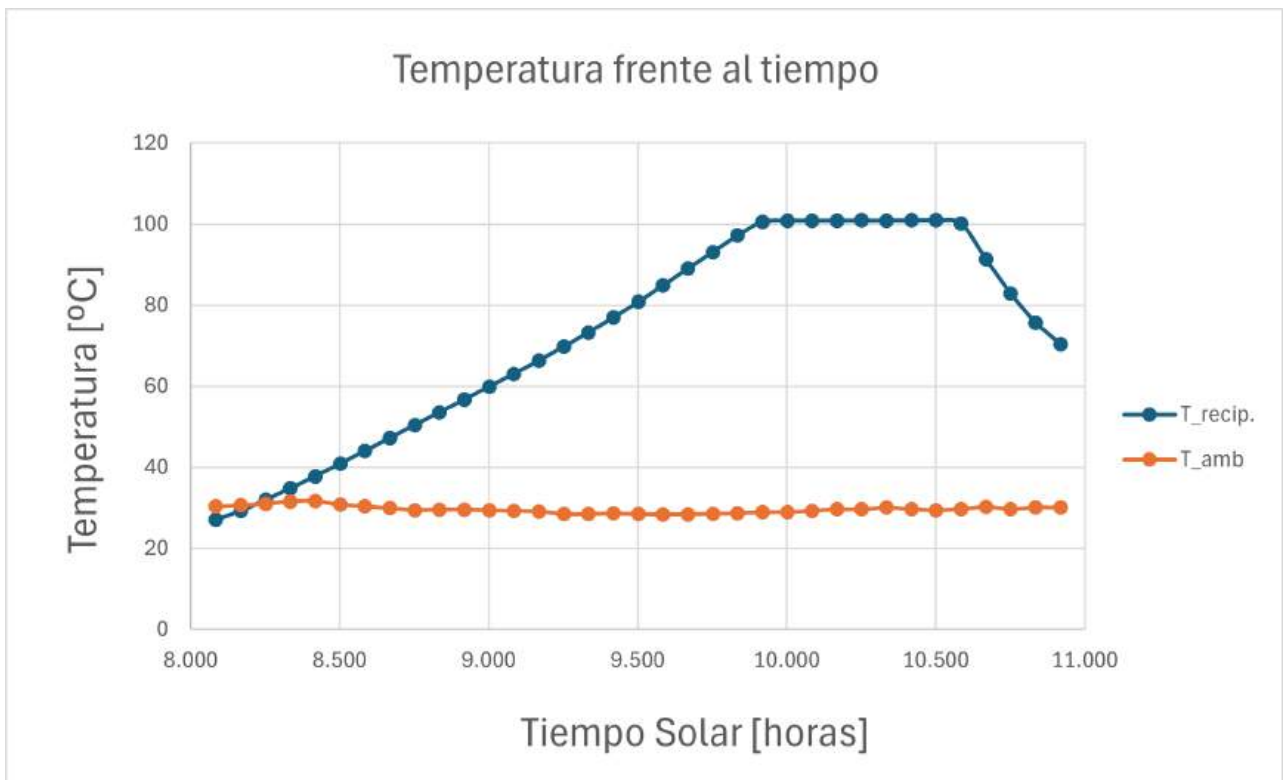


Figura 4.16: Temperatura frente al tiempo

Se puede observar claramente como con este método, la cocina ha sido capaz de mantener el agua hirviendo durante 40 minutos, contando con que para cocinar ya es suficiente con temperaturas algo menores, es tiempo más que de sobra para que se realice un cocinado.

En este caso la potencia útil y nominal no son datos de gran interés debido a que con esa configuración no se está buscando alcanzar la mayor potencia cuanto antes, sino que se busca algo más funcional.

4.4. Análisis de resultados

Como ya se ha ido comentado a lo largo de los ensayos, ha quedado demostrado que es perfectamente viable el uso de recipientes de vidrio tintado en cocinas solares. Además, aunque con tan solo un ensayo, también se ha demostrado la posibilidad de calentar agua de manera desatendida, algo que no se había planteado hasta ahora. Además de haberse realizado numerosos cocinando, que, aunque no sean representativos en cuanto al análisis experimental, dejan más que demostrada la viabilidad de cocinar con esta metodología. Estos resultados son muy positivos, ya que el uso de estos recipientes, además de la nueva metodología desatendida, podrían hacer el uso de las cocinas solares algo mucho más interesante para un público más amplio. De esta manera se le podría dar mayor visibilidad a este sector, fomentando un tipo de cocina limpio y sostenible.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha llevado a cabo la caracterización termo-óptica de recipientes de vidrio tintado, para su uso en cocinas solares. Esta caracterización incluyó el modelado de los recipientes, un análisis de la transmisividad y absortividad del vidrio y, por último, una simulación del trazado de rayos solares sobre este.

Además, se realizaron ensayos experimentales en distintos escenarios de trabajo. Por un lado se comparó el comportamiento de estos recipientes con el de otro más tradicional, que es la olla negra metálica, y por otro lado, se estudió el comportamiento de la cocina, con estos nuevos recipientes, de forma desatendida, algo que rompe con la norma.

Esto permitió demostrar la viabilidad, técnica y práctica del uso de estos recipientes como una alternativa a los tradicionales, incluyendo ejemplos de cocinados reales que demuestran su buen funcionamiento.

5.1. Futuras líneas de trabajo

Al tratarse de un TFG, está limitado en el tiempo, por lo que sería interesante seguir estudiando las siguientes ideas:

- Seguir estudiando el comportamiento de los recipientes de vidrio tintado en otro tipo de condiciones, como por ejemplo en los demás tipos de cocinas solares.
- Se podrían realizar estudios con un recipiente metálico negro con las mismas dimensiones que los recipientes de vidrio oscuro.
- En cuanto a el uso de cocina desatendida, aún queda mucho por hacer para demostrar que su uso es completamente viable, además de poder caracterizar su uso en mayor profundidad lanzando un mayor número de ensayos.

APÉNDICE A

Tablas

Este anexo se ha dedicado para una recopilación de tablas y datos de interés para una mejor comprensión del estudio realizado.

A.1. Ensayo N° 1

Temperatura [°C]			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
9.418	38.0605	36.057	32.766
9.501	46.0265	41.899	37.15
9.585	54.554	47.939	41.654
9.668	63.188	54.072	46.218
9.751	71.7345	60.369	50.906
9.835	79.821	66.61	55.576
9.918	87.3855	72.74	60.248
10.001	94.2065	78.703	64.884
10.085	99.476	84.453	69.501
10.168		90.14	74.259
10.251		95.711	78.919
10.335			83.217
10.418			87.495
10.501			91.806
10.585			96.818

Tabla A.1: Ensayo N°1. Temperatura

Eficiencia			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
9.418	0.236024271	0.092067359	0.069701172
9.501	0.268521318	0.095697721	0.071854391
9.585	0.278303765	0.098562548	0.073497421
9.668	0.276745607	0.098320658	0.073422304
9.751	0.263583239	0.099572389	0.073655209
9.835	0.248177796	0.097795551	0.073542883
9.918	0.228785566	0.095118383	0.07310169
10.001	0.204012906	0.091494338	0.072027457
10.085	0.101795828	0.087342375	0.072811215
10.168		0.090183194	0.073928337
10.251		0.119720954	0.070906901
10.335			0.065691186
10.418			0.066325251
10.501			0.068693179
10.585			0.090754989

Tabla A.2: Ensayo N°1. Eficiencia

Potencia Normalizada DNI850				
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur	Recipiente Norte + Sur
9.418	100.3103151	39.1286274	29.62299795	68.75162536
9.501	114.12156	40.67153149	30.53811602	71.20964751
9.585	118.2791001	41.88908282	31.23640384	73.12548666
9.668	117.616883	41.7862798	31.20447917	72.99075898
9.751	112.0228767	42.31826545	31.30346376	73.62172922
9.835	105.4755632	41.56310933	31.25572508	72.81883441
9.918	97.23386571	40.42531266	31.06821805	71.49353071
10.001	86.70548495	38.88509344	30.61166931	69.49676275
10.085	43.26322699	37.12050927	30.94476618	68.06527544
10.168		38.32785736	31.41954338	69.74740074
10.251		50.88140554	30.13543307	81.01683861
10.335			27.9187539	27.9187539
10.418			28.18823159	28.18823159
10.501			29.19460101	29.19460101
10.585			38.57087022	38.57087022

Tabla A.3: Ensayo N°1. Potencia normalizada

Radiación incidene frente a DELTAT			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
9.418	0.00105677	-0.001278845	-0.00511538
9.501	0.00992087	0.005122886	-0.000397555
9.585	0.01934499	0.011678619	0.004394693
9.668	0.02889705	0.01850305	0.009547975
9.751	0.03818322	0.025350094	0.014665138
9.835	0.04724894	0.032386542	0.019973276
9.918	0.05559923	0.039151652	0.025122554
10.001	0.06291365	0.04560998	0.030186407
10.085	0.06824308	0.051510323	0.034856652
10.168		0.058191209	0.040402285
10.251		0.063857458	0.045082495
10.335			0.049308512
10.418			0.053965431
10.501			0.059879732
10.585			0.065140567

Tabla A.4: Ensayo N^o1. Radiación incidente frente a la variación de temperara

Potencia Útil				
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur	Recipiente Norte + Sur
9.418	101.231433	39.48793333	29.89501667	69.38295
9.501	115.498717	41.16233333	30.90663333	72.06896667
9.585	120.068433	42.52278333	31.70895	74.23173333
9.668	121.359117	43.1158	32.19731667	75.31311667
9.751	116.719633	44.09253333	32.61591667	76.70845
9.835	110.3011	43.46463333	32.68568333	76.15031667
9.918	101.859333	42.34836667	32.54615	74.89451667
10.001	91.3943333	40.98791667	32.26708333	73.255
10.085	45.6971667	39.20886667	32.68568333	71.89455
10.168		40.25536667	32.99963333	73.255
10.251		38.79026667	31.70895	70.49921667
10.335			29.5113	45.17391667
10.418			29.75548333	29.89501667
10.501			30.62756667	30.66245
10.585			40.42978333	40.447225

Tabla A.5: Ensayo N^o1. Potencia útil

A.2. Ensayo N^o 2

Temperatura [°C]			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
8.75133143	31.048	30.827	30.476
8.83466477	37.311	34.143	33.276
8.9179981	43.648	38.514	36.656
9.00133143	49.808	43.238	40.177
9.08466477	55.967	48.209	43.809
9.1679981	62.279	53.194	47.397
9.25133143	68.508	58.299	51.003
9.33466477	74.668	63.418	54.554
9.4179981	80.63	68.502	58.071
9.50133143	86.247	73.489	61.545
9.58466477	91.452	78.336	64.966
9.6679981	96.207	82.973	68.283
9.75133143		87.565	71.564
9.83466477		92.053	74.818
9.9179981		96.519	78.003
10.0013314			81.037
10.0846648			83.849
10.1679981			86.617
10.2513314			89.354
10.3346648			92.341
10.4179981			96.45

Tabla A.6: Ensayo N^o 2. Temperatura

Eficiencia			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
8.751331432	0.191490798	0.040180489	0.03882304
8.834664765	0.233450418	0.072760228	0.057136308
8.917998099	0.228214066	0.082738964	0.063190747
9.001331432	0.224020673	0.087774713	0.064900641
9.084664765	0.225005858	0.090927025	0.065906228
9.167998099	0.228169514	0.090256928	0.064804474
9.251331432	0.221596144	0.091898805	0.06413211
9.334664765	0.215807254	0.09016967	0.062201191
9.417998099	0.203811233	0.08824278	0.061091155
9.501331432	0.191476781	0.085564556	0.059999536
9.584664765	0.173576001	0.082134026	0.057916123
9.667998099	0.151826211	0.078123341	0.056446027
9.751331432		0.077195737	0.055091602
9.834664765		0.074778247	0.054742371
9.917998099		0.076818301	0.051965321
10.00133143			0.049639729
10.08466477			0.046148481
10.1679981			0.045888058
10.25133143			0.04685208
10.33466477			0.049915316
10.4179981			0.091636787

Tabla A.7: Ensayo N° 2. Eficiencia

Potencia Normalizada DNI850				
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur	Recipiente Norte + Sur
8.751331432	81.3835891	17.07670773	16.49979193	33.57649966
8.834664765	99.2164276	30.92309669	24.28293111	55.2060278
8.917998099	96.9909781	35.16405978	26.85606763	62.02012741
9.001331432	95.2087862	37.30425293	27.58277233	64.88702526
9.084664765	95.6274898	38.64398562	28.0101471	66.65413272
9.167998099	96.9720434	38.35919439	27.54190157	65.90109596
9.251331432	94.1783611	39.05699212	27.25614655	66.31313867
9.334664765	91.7180828	38.32210984	26.4355063	64.75761613
9.417998099	86.619774	37.50318139	25.96374096	63.46692235
9.501331432	81.3776321	36.3649364	25.49980297	61.86473937
9.584664765	73.7698003	34.9069611	24.61435243	59.52131353
9.667998099	64.5261396	33.20242008	23.98956141	57.19198149
9.751331432		32.8081882	23.41393104	56.22211924
9.834664765		31.78075496	23.26550783	55.04626279
9.917998099		32.64777794	22.08526155	54.73303948
10.00133143			21.09688493	21.09688493
10.08466477			19.61310431	19.61310431
10.1679981			19.50242452	19.50242452
10.25133143			19.91213409	19.91213409
10.33466477			21.21400938	21.21400938
10.4179981			38.94563449	38.94563449

Tabla A.8: Ensayo N^o 2. Potencia normalizada

Radiación incidene frente a DELTAT			
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur
8.751331432	-0.00127638	-0.001563044	-0.002018338
8.834664765	0.00645666	0.002331896	0.001203055
8.917998099	0.0141687	0.007477928	0.005056528
9.001331432	0.02194876	0.013400845	0.009418322
9.084664765	0.02988498	0.019804211	0.014086835
9.167998099	0.03759095	0.025837717	0.018338155
9.251331432	0.04503235	0.031925516	0.022558541
9.334664765	0.05210759	0.037880564	0.026670932
9.417998099	0.05813216	0.043004126	0.029992871
9.501331432	0.06519196	0.049290631	0.034403856
9.584664765	0.07069781	0.054495253	0.03797892
9.667998099	0.07538595	0.059260627	0.041361201
9.751331432		0.064211171	0.044861599
9.834664765		0.068677848	0.047968152
9.917998099		0.073391776	0.051183175
10.00133143			0.054152671
10.08466477			0.057627027
10.1679981			0.060627515
10.25133143			0.063748719
10.33466477			0.066711662
10.4179981			0.071511956

Tabla A.9: Ensayo N° 2. Radiación incidente frente a la variación de temperatura

A.3. Ensayo N° 3

Temperatura [°C]	
Tiempo Solar	Recipiente
8.08466477	26.996
8.1679981	29.171
8.25133143	31.936
8.33466477	34.765
8.4179981	37.726
8.50133143	40.837
8.58466477	44.015
8.6679981	47.151
8.75133143	50.367
8.83466477	53.554
8.9179981	56.682
9.00133143	59.851
9.08466477	63.047
9.1679981	66.295
9.25133143	69.725
9.33466477	73.234
9.4179981	76.911
9.50133143	80.76
9.58466477	84.845
9.6679981	88.994
9.75133143	93.091
9.83466477	97.163
9.9179981	100.503
10.0013314	100.861
10.0846648	100.843
10.1679981	100.852
10.2513314	100.876
10.3346648	100.871
10.4179981	100.9
10.5013314	100.879
10.5846648	100.065
10.6679981	91.282
10.7513314	82.807
10.8346648	75.652
10.9179981	70.385

Tabla A.10: Ensayo N° 3. Temperatura

Potencia Útil				
Tiempo Solar	Olla	Recipiente Norte	Recipiente Sur	Recipiente Norte + Sur
8.75133143	73.8131333	15.4882	14.96495	30.45315
8.83466477	89.6501667	27.94155	21.94161667	49.88316667
8.9179981	87.5571667	31.74383333	24.24391667	55.98775
9.00133143	86.0920667	33.73218333	24.94158333	58.67376667
9.08466477	86.5804333	34.98798333	25.36018333	60.34816667
9.1679981	88.1850667	34.88333333	25.04623333	59.92956667
9.25133143	86.3013667	35.7903	24.97646667	60.76676667
9.33466477	85.3246333	35.65076667	24.59275	60.24351667
9.4179981	81.6967667	35.3717	24.4881	59.8598
9.50133143	76.8131	34.3252	24.0695	58.3947
9.58466477	70.2550333	33.24381667	23.4416	56.68541667
9.6679981	62.3016333	32.05778333	23.16253333	55.22031667
9.75133143		31.91825	22.77881667	54.69706667
9.83466477		31.11593333	22.77881667	53.89475
9.9179981		32.0229	21.66255	53.68545
10.0013314			20.7207	20.7207
10.0846648			19.22071667	19.22071667
10.1679981			19.22071667	19.22071667
10.2513314			19.63931667	19.63931667
10.3346648			20.96488333	20.96488333
10.4179981			38.58096667	38.58096667

Tabla A.11: Ensayo N° 2. Potencia útil

APÉNDICE B

Fichas técnicas

Rango de longitud de onda	300 a 1100 nm
Resolución óptica FWHM	< 7 nm
Precisión de la longitud de onda	± 0,2 nm
Respuesta direccional a 1000 W/m ²	< 5 %
Respuesta de temperatura	< 2 % (-10 °C a 50 °C)
Control de temperatura	25 °C
Rango de temperatura de funcionamiento	-10 a 50 °C
Tiempo de exposición	10 a 5000 ms
Material de la cúpula	Cuarzo
Comunicación	RS-422 / 232C
Fuente de alimentación	12 VCC, 50 VA
Dimensiones mm	220 (profundidad) x 197 (alto)

Tabla B.1: Ficha técnica MS-711. Parte 1

Peso	4,5 kilos
Protección contra la entrada	IP65
Fuente de alimentación (adaptador de corriente)	100-240 V CA, 50/60 Hz
Consumo de energía	50 vatios
Condiciones de funcionamiento de la fuente de alimentación	-10 a 40 °C / 0 a 90 % HR
Dimensiones de la fuente de alimentación (mm)	320 (ancho) x 240 (profundidad) x 80 (alto)
Peso de la fuente de alimentación	1 kilogramo
Programa	Software de análisis NamI OR WSDAc
Sistema operativo	Microsoft Windows 7/8/9/10
Funciones	Mostrar y analizar datos
Longitud del cable	10 metros (20 metros/30 metros)
Campo de visión (FOV)	180°

Tabla B.2: Ficha técnica MS-711. Parte 2

APÉNDICE C

Puesta en práctica

Este anexo se añade como una sección complementaria al trabajo donde se muestran ensayos realizados con comida, es decir, recetas reales con la puesta en práctica de lo que se ha demostrado a lo largo del estudio. En estos ensayos no se han llevado a cabo toma de datos, son más bien una herramienta visual para mostrar la utilidad de la cocina desatendida en recipientes de vidrio tintado.

Algunas de las recetas que se han realizado son:

- Lentejas.

- Pollo asado.

- Lomo de cerdo asado.

- Lomo de cerdo deshilachado.

- Manzana asada.



Figura C.1: Lentejas



Figura C.2: Lentejas en plato



Figura C.3: Cerdo deshilachado



Figura C.4: Cerdo deshilachado en plato



Figura C.5: Pollo asado



Figura C.6: Pollo asado en plato

Bibliografía

- [1] American Society of Agricultural Engineers. ASAE S580.1 NOV2013. Testing and Reporting Solar Cooker Performance, 2013.
- [2] Xabier Apaolaza-Pagoaga, Antonio Carrillo-Andrés, Juan-Pablo Jiménez-Navarro, and Celestino Rodrigues Ruivo. Experimental evaluation of the performance of new copenhagen solar cooker configurations as a function of solar altitude angle. *Renewable Energy*, 229:120782, 2024.
- [3] Xabier Apaolaza-Pagoaga, Antonio Carrillo-Andrés, and Celestino Rodrigues Ruivo. Experimental thermal performance evaluation of different configurations of copenhagen solar cooker. *Renewable Energy*, 184:604–618, 2022.
- [4] Xabier Apaolaza-Pagoaga, Antonio Carrillo-Andrés, and Celestino Rodrigues Ruivo. Experimental thermal performance evaluation of different configurations of copenhagen solar cooker. *Renewable Energy*, 184:604–618, 2022.
- [5] Kundapur Ashok. A review of solar cooker designs. *TIDE*, 8(1):1–37, 1998.
- [6] Antonio Carrillo-Andrés, Xabier Apaolaza-Pagoaga, Celestino Rodrigues Ruivo, Eduardo Rodríguez-García, and Francisco Fernández-Hernández. Optical characterization of a funnel solar cooker with azimuthal sun tracking through ray-tracing simulation. *Solar Energy*, 233:84–95, 2022.
- [7] Jay Patel, Amit R. Patel, and Chintan Mulasiya. Determination of optical and thermal performance of a large-sized flat plate solar reflector unit under azimuthal sun alignment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(17):8991–9011, Sep 2023.
- [8] Desireddy Shashidhar Reddy and Mohd Kaleem Khan. Design and ray tracing of multifaceted Scheffler reflector with novel crossbars. *Solar Energy*, 185(May):363–373, 2019.
- [9] Naveed Rehman. Optical-irradiance ray-tracing model for the performance analysis and optimization of a façade integrated solar collector with a flat booster reflector. *Solar Energy*, 173(June):1207–1215, 2018.
- [10] José Ruelas, Gabriel Pando, Baldomero Lucero, and Juan Tzab. Ray tracing study to determine the characteristics of the solar image in the receiver for a scheffler-type solar concentrator coupled with a stirling engine. *Energy Procedia*, 57:2858–2866, 2014.
- [11] Celestino Rodrigues Ruivo, Antonio Carrillo-Andrés, and Xabier Apaolaza-Pagoaga. Experimental determination of the standardised power of a solar funnel cooker for low sun elevations. *Renewable Energy*, 170:364–374, 2021.
- [12] Abhishek Saxena, Varun, S.P. Pandey, and G. Srivastav. A thermodynamic review on solar box type cookers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6):3301–3318, 2011.

- [13] SCI. Copenhagen Solar Cooker, 2023. accessed 30 November 2023.
- [14] Solar Cookers International. Solar panel cooker designs, 2023. accessed 28 November 2023.
- [15] Tim Wendelin, Aron Dobos, and Allan Lewandowski. SolTrace: A ray-tracing code for complex solar optical systems. *Contract*, 303(October):275–3000, 2013.
- [16] Bin Zou, Yiqiang Jiang, Yang Yao, and Hongxing Yang. Optical performance of parabolic trough solar collectors under condition of multiple optical factors. *Applied Thermal Engineering*, 160(July):114070, 2019.