

Universidad de Huelva

**Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas
Informáticos y Automática**



Valorización energética de biomasa agroindustrial mediante secado solar y gasificación: prototipado, modelado y monitorización inalámbrica

**Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:**

Antonio Rodríguez Orta

Fecha de lectura: 27 de enero de 2026

Bajo la dirección de los doctores:

Juan Antonio Gómez Galán

Manuel Sánchez Raya

Huelva, 2026





Universidad de Huelva

*Departamento de Ingeniería Electrónica,
de Sistemas Informáticos y Automática*

Programa de Doctorado
Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental

Tesis Doctoral

**Valorización energética de biomasa
agroindustrial mediante secado solar y
gasificación: prototipado, modelado y
monitorización inalámbrica**

Autor

Antonio Rodríguez Orta

Directores

Juan Antonio Gómez Galán

Manuel Sánchez Raya

Huelva 2025

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis tutores de tesis, el Dr. Juan Antonio Gómez Galán y el Dr. Manuel Sánchez Raya, por las incontables horas compartidas y por todo el conocimiento en programación, desarrollo y sistemas que generosamente me transmitieron. Sus orientaciones, siempre acompañadas de paciencia y entusiasmo, han sido una fuente inagotable de inspiración y aprendizaje. Manuel, con su manera clara y cercana de desentrañar los aspectos más complejos, y Juan Antonio, con su visión académica y humana, siendo la fuerza impulsora de este trabajo, han representado no solo referentes científicos, sino también un ejemplo de dedicación y compromiso que me acompañará en el futuro.

Asimismo, quisiera agradecer al Dr. David Vera por su generosa colaboración y apoyo, permitiéndome unirme a los proyectos que tenía abiertos y facilitando el acceso a las instalaciones, equipamiento y laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Linares. Su disposición y confianza han sido decisivas para avanzar en las diferentes fases de esta investigación, además de ofrecerme la oportunidad de conocer y participar en un entorno investigador altamente estimulante.

De igual manera, expreso mi reconocimiento a mis compañeros y colaboradores más cercanos: Roque Aguado, Rodrigo López y Antonio Escámez. Su dedicación, apoyo técnico y científico, así como los momentos compartidos en el laboratorio, en la puesta en marcha de los sistemas y en el análisis de resultados, han enriquecido enormemente esta experiencia. En particular, agradezco a Rodrigo por su generosidad y entrega, que se extendió incluso más allá del ámbito académico al brindarme ayuda desinteresada en innumerables ocasiones. A todos ellos, mi gratitud más sincera por su amistad y compromiso.

Finalmente, quiero dedicar un agradecimiento especial a mi familia, en particular a mis padres y a mi hermana, por su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Su confianza, comprensión y cariño han sido la base sobre la que se ha sostenido esta trayectoria académica y personal.

Gracias a todos por haber formado parte de este camino.

Resumen

La agricultura es una de las actividades fundamentales para el ser humano, pero también es una fuente considerable de residuos orgánicos que muchas veces no reciben un tratamiento adecuado. En particular, la producción de aceite de oliva genera grandes cantidades de subproductos como el alperujo o alpeorujo (una mezcla de piel, pulpa, huesos, aceite y agua residual), hojas de olivo y restos de poda. Estos residuos, si no se gestionan de manera eficiente, pueden convertirse en una carga ambiental significativa, contaminando suelos y fuentes de agua debido a su alto contenido en materia orgánica y compuestos fenólicos. Sin embargo, en lugar de ver estos subproductos como un problema, es posible revalorizarlos mediante tecnologías sostenibles que fomenten la *economía circular* en el sector agrícola. Entre estas alternativas, el uso de secaderos solares y sistemas de gasificación destacan por su potencial para transformar residuos en recursos útiles, como energía térmica, electricidad, utilizarse en la alimentación animal como fuente de fibra y grasa o incluso productos con valor añadido, como podría ser la producción de biocarbón (*biochar* en inglés) que permite mejorar la retención de agua del terreno o cosméticos. Estas soluciones no solo mitigan el impacto ambiental, sino que también ofrecen oportunidades económicas para los productores. En la presente Tesis Doctoral se presentan un par de alternativas que demuestran que es posible proponer diferentes estrategias aplicando los beneficios de las nuevas tecnologías al contexto de la olivicultura.

En primer lugar, se ha realizado un estudio que pretende optimizar el proceso de deshidratación del alperujo mediante la combinación de dinámica de fluidos computacional (CFD) y aprendizaje profundo (Deep Learning). A través de CFD, se identifica la velocidad óptima de entrada de aire en un prototipo de deshidratador solar indirecto pasivo para alperujo, que permite reducir su contenido de humedad para su posterior uso en aplicaciones energéticas. El prototipo fue simulado utilizando el software ANSYS, siguiendo una secuencia estructurada que incluyó: el diseño del modelo, la generación de la malla, la selección de modelos físicos apropiados, la asignación de propiedades de los materiales, la definición de condiciones de contorno y, finalmente, la validación de resultados mediante la comparación con los datos experimentales obtenidos del prototipo. Tras este proceso, se concluyó que la velocidad óptima de entrada de aire a la cámara de deshidratación es de 0.1 m/s. Al mismo tiempo, se utilizó un modelo de red neuronal artificial para analizar los datos de los sensores del prototipo físico, revelando que la radiación solar y la temperatura ambiente son las variables más influyentes en la temperatura de la cámara de deshidratación. Este análisis dio como resultado un modelo predictivo para la optimización del proceso de deshidratación, con un coeficiente de correlación de 0.9699 para $temp_{up}$ y 0.9710 para $temp_{down}$ (sensores de temperatura colocados dentro del prototipo en las zonas superior e inferior), y un coeficiente de Willmott de 0.9999, demostrando una alta concordancia entre las predicciones del modelo y los datos

experimentales. Las variables de entrada del modelo incluyen la radiación solar, la temperatura ambiente y la humedad del aire tanto exterior como interior. Esta integración de CFD y Deep Learning constituye una metodología prometedora y de alto potencial para optimizar los procesos de deshidratación en el ámbito industrial, con especial relevancia en la mejora del tratamiento del orujo de aceituna.

La viabilidad del prototipo de secadero solar, la comprobación de los resultados de la simulación inicial y la robustez del sistema se validaron experimentalmente mediante el diseño de un sistema inalámbrico de adquisición de datos para la recopilación, almacenamiento remoto, visualización y análisis de datos en tiempo real, con acceso posible desde múltiples dispositivos. Los resultados de una campaña de pruebas de larga duración revelaron que el contenido de humedad del alperujo se redujo efectivamente del 67.17% al 39.90% en un período de 10 días. Se logró una eficiencia máxima de secado de 16.64%, con potencial para valores más altos en condiciones climáticas favorables. La simplicidad del diseño y la solución de bajo coste pueden facilitar la futura implementación a gran escala de un sistema similar, el cual suponga un ahorro energético en el proceso de secado del alperujo, a la vez que ofrece una alternativa para captar parte del contenido en agua de las muestras que se puede utilizar para regadío.

La segunda propuesta desarrolla un sistema automatizado de monitorización y control remoto, en tiempo real, aplicado a un prototipo de gasificador de biomasa destinado a la generación de electricidad a partir de residuos agrícolas. El prototipo está compuesto por un gasificador de lecho fijo de flujo descendente o *downdraft*, con un ventilador que utiliza aire como agente gasificante, motores para favorecer el flujo de combustible hacia la cámara de combustión, a la vez que reducen la acumulación de cenizas en las paredes del reactor, así como una unidad de acondicionamiento de gas producto, operando conjuntamente como un sistema controlado a distancia. El conjunto propuesto integra funcionalidades para la adquisición y almacenamiento de datos, destacando por su diseño compacto, portabilidad y bajo coste, lo que lo convierte en una solución viable para su implementación en pequeñas explotaciones agrícolas, especialmente en zonas donde la electrificación convencional es limitada o inexistente.

Se llevaron a cabo dos pruebas preliminares para evaluar el funcionamiento del sistema de monitorización y control. En la primera prueba, el sistema alcanzó una temperatura objetivo de 600 °C en menos de 20 minutos, con una oscilación de ± 25 °C. Tras mantener dicha temperatura durante una hora, se incrementó el punto de consigna a 800°C, alcanzándose esta temperatura en menos de 10 minutos. En la segunda prueba, el sistema alcanzó el punto de consigna de 800 °C en 16 minutos, requiriendo de 3 minutos adicionales para su estabilización. Ambas pruebas, con una duración aproximada de dos horas cada una,

consumieron un total de 13.43 kg de biomasa. Los resultados han demostrado la capacidad del sistema para alcanzar las temperaturas objetivo en menos de 25 minutos, manteniendo oscilaciones térmicas estables y en un rango esperado. La interfaz gráfica desarrollada permite la monitorización y gestión de las temperaturas en diversas zonas a lo largo del gasificador, de forma intuitiva, en tiempo real y con acceso remoto. Asimismo, la interfaz posibilita el control manual o algorítmico del sistema, con la opción de modificar los algoritmos de control mediante actualizaciones inalámbricas.

Se concluye que tanto la propuesta del secadero solar como la del gasificador portátil son alternativas contrastadas que resultan interesantes, no solo para reducir los problemas de gestión de elementos con potencial contaminante, sino también para sacarle rédito a esa materia prima. Además, gracias a su bajo coste y fácil utilización, con elementos como una interfaz de usuario intuitiva, las hace extrapolables a otros sectores dentro del marco de la *economía circular*. Finalmente, se ha demostrado el potencial del desarrollo de sistemas de sensado inalámbricos para optimizar el control y la monitorización de los mencionados procesos de revalorización energética de residuos agrícolas.

Palabras clave: secadero solar, gasificación de biomasa, comunicaciones inalámbricas, sensores, alperujo, dinámica de fluidos computacional, Deep Learning, gasto de energía, prototipo, monitorización en tiempo real, gas producto, automatización de procesos, acceso remoto, bajo coste.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	<i>I</i>
<i>Resumen</i>	<i>II</i>
<i>Índice</i>	<i>V</i>
<i>Listado de figuras</i>	<i>VII</i>
<i>Listado de tablas</i>	<i>IX</i>
<i>Nomenclatura</i>	<i>X</i>
Subíndices	X
Abreviaturas	X
Capítulo 1 Introducción	1
2.1 Motivación del trabajo	1
2.2 El aceite de oliva y la problemática de sus residuos	4
2.2.1 Alambique solar como agente de reducción de la dependencia de los combustibles fósiles	5
2.2.2 Bioenergía y producción de hidrógeno verde: sinergia para una transición energética sostenible	6
2.3 Alcance y objetivos de la Tesis Doctoral	9
2.3.1 Secadero o alambique solar	9
2.3.2 Modelado del alambique solar mediante dinámica de fluidos computacional y aprendizaje profundo	10
2.3.3 Gasificador de biomasa para la generación de gas producto	11
2.4 Contribuciones científicas	13
2.5 Estructura de la Tesis Doctoral	14
Capítulo 2 Estado de la técnica	17
2.1 La industria oleícola, producción de aceite de oliva y aprovechamiento de residuos	17
2.2 El secado al sol, tipologías de secaderos solares	19
2.2.1 Secaderos solares directos	20
2.2.2 Secaderos solares indirectos	21
2.2.3 Secaderos solares de modo mixto	22
2.2.4 Aporte de valor de la propuesta	23
2.3 Simulación basada en dinámica de fluidos y aprendizaje profundo para la optimización del proceso de secado	24
2.3.1 CFD y Deep Learning	24
2.3.2 Cinética del secado: revisión el estado actual	25
2.3.3 Valor añadido de la propuesta	27
2.4 Gasificación y automatización del control	28
2.4.1 La gasificación de biomasa, tipologías de gasificadores	28
2.4.2 Automatización y control en gasificadores de biomasa	31
2.4.3 Elemento distintivo de la propuesta	32

Capítulo 3 Validación experimental de un alambique solar monitorizado de forma inalámbrica para el secado eficiente de orujo de aceituna y la producción de agua destilada _____ **33**

3.1	Alambique solar, diseño mecánico	33
3.2	Diseño de hardware	36
3.3	Firmware	39
3.4	Resultados	41
3.4.1	Cálculo del contenido de humedad	41
3.4.2	Cálculo del calor de combustión	42
3.4.3	Funcionamiento del circuito de adquisición de datos: Hardware y software	45
3.4.4	Evolución del contenido de humedad y del PCI	49
3.4.5	Rendimiento de secado	50
3.5	Discusión y conclusiones	53
3.5.1	Prototipo físico	53
3.5.2	Prototipo electrónico	55

Capítulo 4 Optimización del proceso de deshidratación del orujo de aceituna mediante la integración de la dinámica de fluidos computacional y el aprendizaje profundo _____ **56**

4.1	Estudio de dinámica de fluidos computacional	56
4.2	Modelo de red neuronal artificial	60
4.3	Resultados	63
4.3.1	Dinámica de fluidos computacional	63
4.3.2	Perfiles de temperatura y velocidad	63
4.3.3	Modelo de red neuronal artificial	66
4.3.4	Discusión	68
4.3.5	Conclusiones y recomendaciones	70

Capítulo 5 Sistema de control automatizado y monitorización en tiempo real de bajo coste para un gasificador portátil de tiro descendente a escala de laboratorio _____ **72**

5.1	Caracterización de la biomasa y elección del agente gasificante	72
5.2	Diseño del gasificador de biomasa	73
5.3	Operación de la planta	75
5.4	Diseño del hardware e implementación	77
5.4.1	Sensores	77
5.4.2	Actuadores	78
5.4.3	Sistema de control inalámbrico	78
5.4.4	Medida de temperatura y flujo de gas	80
5.4.5	Alimentación del sistema	82
5.5	Firmware y software	83
5.5.1	Firmware	83
5.5.2	Software	85
5.6	Resultados y discusión	85
5.6.1	Rendimiento del sistema durante la primera prueba	87
5.6.2	Rendimiento del sistema durante la segunda fase de arranque	88

5.7	Conclusiones y perspectivas futuras	89
<i>Capítulo 6 Discusión integrada de resultados, conclusiones y trabajos futuros</i>		<i>91</i>
6.1	Conclusiones generales	91
6.2	Trabajos futuros	92
<i>Capítulo 7 Referencias</i>		<i>94</i>

Listado de figuras

Figura 1. 1	Energía suministrada desde 1990 hasta 2022 en TJ (TeraJulios) en función del tipo de fuente de energía [2].	1
Figura 1. 2 a)	Alperujo suministrado para su secado en la primera propuesta.	b)
	Dimensiones de las piscinas de alperujo en una orujera. c) Pellets de orujillo utilizados en la segunda propuesta.	6
Figura 1. 3	Tendencia en la producción de hidrógeno según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [25].	8
Figura 2. 1	Secciones transversales de un decantador de dos fases a) y uno de tres fases b) [16].	17
Figura 2. 2	Productos y subproductos de la industria del aceite de oliva.	19
Figura 2. 3	Tipologías de secaderos solares [44].	20
Figura 2. 4	Principales tipos de gasificadores. Adaptado de [82].	29
Figura 3. 1	Fotografía del prototipo de secadero solar.	34
Figura 3. 2	Vista en 3D y explosionado del prototipo de secadero solar.	35
Figura 3. 3	Primera iteración del diseño de la placa de monitorización.	36
Figura 3. 4	Vista de la sección transversal del prototipo de alambique solar con la ubicación de los sensores indicado con estrellas rojas.	37
Figura 3. 5	Diagrama de bloques del circuito de adquisición de datos.	38
Figura 3. 6	Diagrama de flujo resumido del firmware.	40
Figura 3. 7	Hardware del circuito de adquisición de datos.	45
Figura 3. 8	Interfaz de control con representación gráfica de las variables monitorizadas.	46
Figura 3. 9	Monitorización de la temperatura durante el periodo de estudio.	47
Figura 3. 10	Monitorización de la humedad durante el periodo de estudio.	47
Figura 3. 11	Monitorización de la irradiancia durante el periodo de estudio.	47
Figura 3. 12	Comparación de los registros de temperatura del prototipo y los valores estimados por Renewable Energy (NASA) [103].	48
Figura 3. 13	Comparación de los registros de humedad del prototipo y los valores estimados por Renewable Energy (NASA) [103].	49
Figura 3. 14	Comparación de los registros de irradiancia del prototipo y los valores estimados por Renewable Energy (NASA) [37], [103].	49
Figura 3. 15	Evolución del contenido de humedad y el poder calorífico inferior con respecto al número de días bajo exposición a la radiación solar.	50

Figura 4. 1 Metodología CFD utilizada para la simulación. _____	56
Figura 4. 2 Prototipo CFD. _____	57
Figura 4. 3 Vista de la sección transversal de la malla. _____	57
Figura 4. 4 Tamaño óptimo de malla. _____	58
Figura 4. 5 a) Sistema de adquisición b) Prototipo de campo. _____	60
Figura 4. 6 Gráficas con el número de épocas y las pérdidas. _____	62
Figura 4. 7 Distribuciones de temperatura dentro de la cámara de deshidratación. _____	64
Figura 4. 8 Distribuciones de la velocidad del aire dentro de la cámara de deshidratación. _____	65
Figura 4. 9 Temperatura en la cámara de deshidratación vs velocidad de entrada del aire. _____	66
Figura 4. 10 Proceso de entrenamiento de redes neuronales. _____	67
Figura 4. 11 Representación de las regresiones lineales de temperatura. _____	67
Figura 4. 12 Representación de las regresiones lineales de temperatura hacia abajo. _____	67
Figura 4. 13 Impacto promedio en la magnitud de salida del modelo $temp_{up}$ y $temp_{down}$. _____	68
Figura 5. 1 Pellets de orujillo utilizados como materia prima para la planta de gasificación. _____	73
Figura 5. 2 Descripción general del ensamblaje del prototipo, destacando sus componentes principales. _____	74
Figura 5. 3 Diagrama del ciclo de operación de la planta. _____	75
Figura 5. 4 Diagrama esquemático de los elementos principales del hardware. _____	79
Figura 5. 5 Prototipo de la unidad de control - Hardware. _____	80
Figura 5. 6 a) Montaje completo para la medición y calibración del caudal. b) Detalles del divisor de flujo y del medidor de flujo de referencia (SFM3000). c) Funcionamiento de la válvula en Y. _____	82
Figura 5. 7 Configuración de medición de temperatura. a) Termopar tipo K más transductor b) Estación de soldadura de aire caliente. c) Conexión del sistema de control. _____	82
Figura 5. 8 Diagrama de flujo esquemático del funcionamiento del firmware. _____	84
Figura 5. 9 Imágenes del reactor prototipo, incluida una vista de cerca de la unidad de control. _____	86
Figura 5. 10 a) Zona de combustión durante el arranque. b) Distribución de temperatura en el reactor 30 minutos después del arranque. c) Distribución de temperatura en el reactor alrededor de una hora después del arranque. d) Distribución de temperatura en el reactor durante la operación en estado estable que muestra la ubicación de los termopares. _____	86
Figura 5. 11 Temperaturas del aire y gas producto, junto con el PWM registrado durante el primer arranque. _____	87
Figura 5. 12 Temperaturas del aire y gas producto, junto con el PWM registrado durante el segundo arranque. _____	89

Listado de tablas

<i>Tabla 3. 1 Datos iniciales de las muestras de alperujo: Contenido en humedad.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 3. 2 Análisis elemental de la muestra de alperujo (wt. % base seca).</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3. 3 Resultados del análisis elemental junto con el PCI y los valores de humedad de la muestra durante el experimento.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3. 4 Principales parámetros de rendimiento del prototipo de alambique solar durante el periodo de ensayo.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4. 1 Propiedades térmicas de los materiales.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 4. 2 Resultados de la temperatura experimental y real.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4. 3 Métricas de error del modelo.</i>	<i>66</i>

Nomenclatura

Subíndices

Δh_{vap}	Entalpía de vaporización: cantidad de energía necesaria para transformar una sustancia de estado líquido a gaseoso a una temperatura y presión constantes. También se conoce como calor latente de vaporización
η_{th}	Eficiencia térmica de secado
A_1 / A_2 y P_1 / P_2	Los subíndices 1 y 2 corresponden a la sección cónica convergente y a la sección de garganta del caudalímetro Venturi, respectivamente.
m_{dry} / m_{wet}	Masa de la muestra seca (<i>dry</i>) o húmeda (<i>wet</i>) en kg
S_{glass}	Superficie del cristal
T_f / T_i o m_i / m_f	Valores en la etapa inicial (<i>i</i>) o final (<i>f</i>)
$Temp_{env} / Temp_{up} / Temp_{down}$	Temperatura en las diferentes zonas del prototipo, véase: temperatura en la zona superior, inferior o temperatura ambiente
$Wet_{up} / Wet_{down} / Wet_{env}$	Humedad en las diferentes zonas del prototipo, véase: humedad en la zona superior, inferior o humedad ambiente

Abreviaturas

AAE	Agencia Andaluza de la Energía
ACV	Análisis de ciclo de vida. Metodología sistemática para evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de todas las etapas de su existencia, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final como residuo.
A/D	Convertidor analógico a digital
ANFIS	Sistemas adaptativos de inferencia neuro-difusa. Un modelo computacional que fusiona redes neuronales y lógica difusa para aprovechar sus respectivas fortalezas. Este enfoque permite a ANFIS aprovechar

las capacidades de razonamiento aproximado de los sistemas difusos y adaptarse a las características basadas en datos inherentes a las redes neuronales

B

Cociente de expansión volumétrica del fluido

BASIC

(*Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code*) es un lenguaje de programación de alto nivel, diseñado para ser fácil de aprender y usar, especialmente para principiantes. Fue creado en 1964 por John Kemeny y Thomas Kurtz en el Dartmouth College con el objetivo de hacer la programación accesible a estudiantes y profesores que no eran especialistas en informática. Aunque no es tan común en la actualidad

CFD

Dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*). Es una metodología utilizada para el cálculo del flujo de fluidos en diversas aplicaciones. A través de esto, es posible obtener diferentes tipos de resultados, tales como velocidad, presión y temperatura del flujo de un fluido

db y wb

Base seca (*dry basis*) o base húmeda (*wet basis*)

Dh

Diámetro hidráulico: este diámetro es una medida de la sección transversal de un conducto o tubería, y se utiliza para calcular el número de *Reynolds* en flujos que no son circulares

DIY

Hazlo tú mismo (*Do It Yourself*). Se refiere a la práctica de realizar tareas o proyectos por cuenta propia, sin la ayuda de profesionales, ya sea para ahorrar dinero, desarrollar habilidades manuales o simplemente por satisfacción personal

E

Irradiancia solar de una superficie. Potencia de la radiación solar que incide sobre una unidad de área de esa superficie en un momento determinado (W/m^2)

EEPROM

Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*)

EPS

Escuela Politécnica Superior

<i>FIS</i>	Sistema de inferencia difusa. Es un sistema basado en la lógica difusa, que permite el razonamiento aproximado similar al humano, utilizando variables lingüísticas y reglas basadas en la lógica difusa. En lugar de valores binarios (verdadero o falso), la lógica difusa trabaja con conjuntos difusos que permiten grados de pertenencia entre 0 y 1, lo que facilita el manejo de la incertidumbre y la imprecisión en los datos
<i>FLC</i>	Lógica difusa. Forma de razonamiento que permite valores de verdad intermedios entre el completamente verdadero y el completamente falso, a diferencia de la lógica booleana que solo acepta valores binarios (0 y 1). En esencia, imita el razonamiento humano al lidiar con conceptos vagos e imprecisos, como "caliente", "alto" o "cerca"
<i>g</i>	Aceleración de la gravedad
<i>Gr</i>	Número de Grashof. Consiste en un grupo adimensional que representa la relación entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas en la convección natural
<i>GSM/GPRS</i>	Tecnologías de comunicaciones móviles. GSM (<i>Sistema Global de Comunicaciones Móviles</i>) es un estándar de red 2G que permite la transmisión de voz y datos, mientras que GPRS (<i>Servicio General de Paquetes por Radio</i>) es una evolución de GSM que se centra en la transmisión de datos a mayor velocidad y de forma más eficiente mediante paquete
<i>GUI</i>	Interfaz gráfica de usuario
<i>h</i>	Entalpía. magnitud termodinámica que mide la cantidad total de energía de un sistema termodinámico, como un edificio o una reacción química. En términos más sencillos, es la suma de la energía interna del sistema y el producto de su presión por su volumen. La variación de entalpía (Δh), representa la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno a presión constante
<i>H</i>	Tasa de extracción de humedad SMER

<i>HR</i>	Humedad relativa
<i>ICE</i>	Motor de combustión interna
<i>IEA</i>	Agencia internacional de la energía (<i>International Energy Agency</i>)
<i>I²C</i>	Es un protocolo de comunicación serial síncrono que utiliza dos líneas para la transferencia de datos entre dispositivos. Estas líneas son SDA (<i>Serial Data Line</i>), para los datos, y SCL (<i>Serial Clock Line</i>), para la señal de reloj que sincroniza la comunicación
<i>IoT</i>	Internet de las cosas (<i>Internet of Things</i>). Red de dispositivos físicos, vehículos, electrodomésticos y otros objetos que están equipados con sensores, software y conectividad de red para permitirles recopilar e intercambiar datos
<i>k</i>	Conductividad térmica (<i>k</i>): Una propiedad del material que indica su capacidad para conducir el calor
<i>L</i>	Longitud característica (<i>L</i>): Una longitud representativa del sistema, que se utiliza en la definición del número de Nusselt
<i>MAPE</i>	(<i>Error Porcentual Absoluto Medio</i>) es una métrica utilizada para evaluar la precisión de un pronóstico. Indica el error promedio de un pronóstico en términos porcentuales con respecto a los valores reales. En esencia, te dice qué tan cerca o lejos están tus predicciones de la realidad, expresado como un porcentaje
<i>MIMO</i>	Múltiples entradas y múltiples salidas
<i>MLR</i>	La regresión lineal múltiple es una técnica estadística que se utiliza para modelar la relación entre una variable dependiente (la que se quiere predecir) y múltiples variables independientes (las que se cree que influyen en la variable dependiente) mediante una ecuación lineal. En esencia, busca la mejor línea (o hiperplano en más dimensiones) que se ajuste a los datos, permitiendo predecir el valor de la variable dependiente en función de los valores de las variables independientes

<i>NASA</i>	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU.
<i>NTP</i>	Protocolo de Tiempo de Red (<i>Network Time Protocol</i>)
<i>Nu</i>	Número de Nusselt. Indica la relación entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción dentro de un fluido, lo que proporciona información sobre la eficiencia del intercambio de calor entre una superficie sólida y el fluido circundante
<i>OTA</i>	Actualizaciones inalámbricas (<i>Over The Air</i>)
<i>PCI/PCS</i>	Poder calorífico inferior o superior
<i>PCB</i>	Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board)
<i>PID</i>	Proporcional, Integral, Derivativo. Es un tipo de controlador que se utiliza para regular y mantener una variable de proceso, como la temperatura, la velocidad o la presión, en un valor deseado. El controlador PID calcula una señal de salida combinando tres acciones: proporcional, integral y derivativo
<i>Pr</i>	El número turbulento Prandtl (<i>Pr</i>) es un término adimensional definido como la relación entre el momento difusividad Eddy y la difusividad del remolino de transferencia de calor. Es útil para resolver el problema de los flujos turbulentos de la capa límite
<i>PSO</i>	Optimización por enjambre de partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>). Hace referencia a una serie de métodos y algoritmos de optimización heurísticos que evocan el comportamiento de los enjambres de abejas en la naturaleza
<i>PSTN</i>	Es la red telefónica tradicional que ha existido durante décadas para las llamadas de voz. Se refiere a la infraestructura física que permite la comunicación por voz entre diferentes usuarios, tanto a nivel local como internacional.
<i>PWM</i>	Modulación por ancho de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)

<i>Q</i>	Caudal térmico o caudal de un fluido
<i>r</i>	Tasa de secado promediada en el tiempo
<i>R</i>	Exposición a la radiación solar en MJ/m ²
<i>Rad</i>	Radiación solar
<i>Re</i>	Número de Reynolds. Número adimensional importante en mecánica de fluidos que ayuda a determinar si el flujo de un fluido es laminar o turbulento
<i>RNA</i>	Redes neuronales artificiales (RNA) son modelos matemáticos inspirados en la estructura y función del cerebro humano que se utilizan en la inteligencia artificial (AI) y el aprendizaje automático (“ <i>Machine Learning</i> ”, ML)
<i>RTC</i>	Reloj de tiempo real (<i>Real Time Clock</i>). Se utiliza para mantener la hora del sistema en caso de pérdida de alimentación
<i>RTOS</i>	Sistema operativo en tiempo real (<i>Real Time Operating System</i>)
<i>SD</i>	Métrica de error SD o desviación estándar de los conjuntos de entrenamiento y prueba. medida estadística que indica la dispersión de los datos alrededor de la media. En esencia, cuantifica cuánto varían los puntos de datos individuales de un conjunto con respecto a su promedio. Una desviación estándar alta sugiere una gran variabilidad, mientras que una baja indica que los datos están más agrupados cerca de la media
<i>SEC</i>	Indica la eficiencia que tiene un motor para transformar carburante en energía mecánica, y se expresa como la cantidad de carburante que hay que consumir (en gramos) para obtener una determinada potencia en kilovatios (kW), durante una hora (g/kWh)
<i>SMER</i>	El valor recíproco del consumo de energía específica es la tasa de extracción de humedad específica (SMER), que indica la cantidad de humedad evaporada

por unidad de energía suministrada al prototipo de alambique solar

SoC

Sistema en un chip (*System on a Chip*). Es un circuito integrado que integra todos los componentes necesarios para un sistema electrónico completo en un solo chip. Esto incluye la unidad central de procesamiento (CPU), memoria, interfaces de entrada/salida, y a veces incluso elementos como la unidad de procesamiento gráfico (GPU), circuitos de gestión de energía y radios inalámbricas

SPI

Protocolo de comunicación serial síncrono que permite la transferencia de datos entre circuitos integrados, como microcontroladores y periféricos

TCP/IP

Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet, es un conjunto de protocolos de comunicación que permite a los dispositivos conectarse y comunicarse a través de redes, incluyendo Internet

TEC

Refrigerador termoelectrico o módulo de Peltier

THT

Tecnología de montaje de componentes electrónico mediante agujeros pasantes (*Through-Hole Technology*)

UART

Siglas de Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), es un dispositivo de hardware que se utiliza para la comunicación serial entre dos dispositivos. Funciona enviando y recibiendo datos bit a bit, a través de dos cables: uno para transmitir y otro para recibir

ω

Viscosidad cinemática del fluido. Medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo la acción de la gravedad. Se calcula dividiendo la viscosidad dinámica de un fluido por su densidad. En términos simples, describe qué tan "espeso" o "aguado" es un líquido y cuán fácilmente fluye

X

Contenido de humedad en la muestra, en base seca

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación del trabajo

El crecimiento descontrolado de la población mundial, que actualmente supera los 8.200 millones de personas [1], ha supuesto un incremento significativo en el consumo de recursos naturales y materiales del planeta. Este aumento, a su vez, ha derivado en una mayor demanda energética. A día de hoy, las fuentes de energía primaria continúan siendo mayoritariamente no renovables, representando aproximadamente un 68.29% de la producción total [2], información que puede visualizarse en la Figura 1. 1. Esta realidad plantea un desafío para nuestra generación si queremos garantizar que las generaciones futuras puedan conocer y habitar un mundo, al menos, en condiciones similares a aquel que nosotros recibimos.

El agotamiento progresivo de los recursos naturales, junto con las evidentes consecuencias del calentamiento global, se han convertido en los principales motores que han impulsado a los gobiernos e instituciones a promover la transición hacia una sociedad hipocarbónica, con modelos energéticos sostenibles y con bajas emisiones de carbono. Este progreso responde a la necesidad urgente de mitigar el impacto ambiental del actual sistema energético y garantizar la sostenibilidad a largo plazo [3].

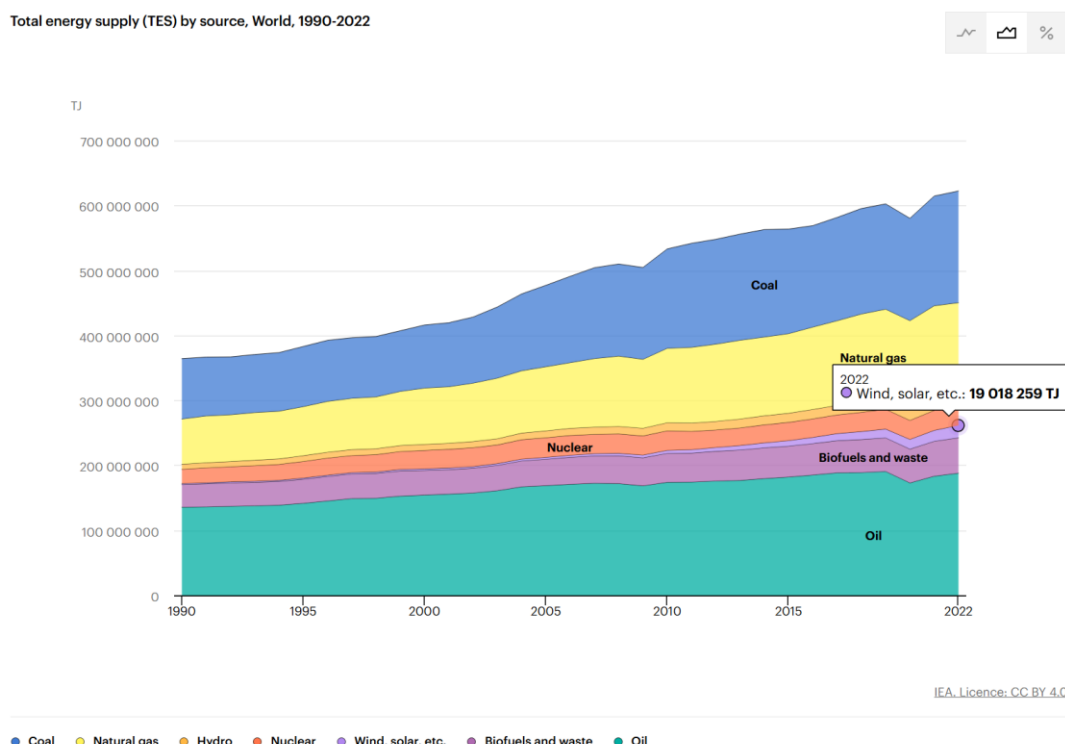


Figura 1. 1 Energía suministrada desde 1990 hasta 2022 en TJ (TeraJulios) en función del tipo de fuente de energía [2].

Actualmente, la generación de energía primaria sigue respondiendo, en gran medida, a un modelo centralizado que recurre a infraestructuras de gran escala para la generación de energía renovable. Un ejemplo representativo de este enfoque es la *Presa de las Tres Gargantas*, ubicada en el río Yangtsé en China, finalizada en 2012. Se trata de la mayor central hidroeléctrica del mundo, tanto por volumen de construcción como por capacidad instalada, con 27.47 millones de metros cúbicos de hormigón y una potencia nominal de 22500MW [4]. Esta cifra supera ampliamente a la de infraestructuras históricas como la presa Hoover (2074MW), la cual suministra energía que alimenta a millones de hogares y negocios en Arizona, California y Nevada, incluyendo la ciudad de Las Vegas [5].

La construcción y operación de estas instalaciones implica un uso intensivo de recursos materiales, energéticos y humanos, además de generar un impacto ambiental significativo. Entre las diferentes problemáticas que tienen este tipo de megaestructuras se encuentran la alteración de ecosistemas acuáticos y terrestres, la pérdida de biodiversidad y el desplazamiento de comunidades locales debido al represamiento de grandes masas de agua [6]. Por tanto, resulta fundamental que el desarrollo de estas infraestructuras se lleve a cabo bajo criterios de sostenibilidad ambiental, social y económica, que equilibren la necesidad de producción energética con la preservación del entorno natural.

Las grandes infraestructuras energéticas representan un avance notable en términos de capacidad instalada y aprovechamiento de recursos renovables que, impulsado por las ventajas asociadas a la economía de escala, tales como la reducción de costes unitarios de producción y un mayor control sobre la gestión y distribución de la energía [7], ha dado lugar a una transformación significativa del paisaje de numerosas regiones.

En el caso de España, destacan varios ejemplos representativos de esta tendencia. Entre ellos se encuentran la planta fotovoltaica *Francisco Pizarro*, ubicada en la provincia de Cáceres, con una potencia instalada de 590MW [8]; la central eólica GECAMA en Castilla-La Mancha, con 329.2MW [9]; o el parque eólico de Huelva que dispone de 456.7MW de potencia distribuidos en catorce parques eólicos [10].

Sin embargo, la centralización de la generación energética también acarrea una serie de desventajas. Las ubicaciones estratégicas que maximizan la captación de energía (como los altos cabezos para aprovechar las corrientes de aire o los cursos fluviales con gran potencial hidráulico) no siempre se encuentran próximas a los grandes centros de consumo. Esta desconexión espacial implica pérdidas notables en las redes de transporte y distribución, además de reducir la seguridad energética al depender de un número limitado de grandes productores [11].

Adicionalmente, el paulatino cierre de centrales nucleares, caracterizadas por su capacidad para suministrar energía de manera estable, aunque con largos tiempos de arranque, ha agravado la inestabilidad del sistema. A esto se suma la intermitencia inherente a fuentes como la solar o la eólica, cuya producción depende directamente de la climatología. Todo ello ha puesto en entredicho la resiliencia del sistema eléctrico, tal y como se evidenció en el apagón generalizado del 28 de abril de 2025, que afectó a extensas áreas del país y subrayó la necesidad urgente de replantear el equilibrio entre generación centralizada, descentralización y almacenamiento energético eficiente.

Es por ello por lo que, en el contexto actual de transición energética, los modelos de generación distribuida o descentralizada están adquiriendo relevancia. Este enfoque se basa en la implantación de pequeñas instalaciones productoras próximas al punto de consumo, lo cual ofrece una serie de ventajas tanto técnicas como medioambientales. El avance tecnológico acontecido los últimos años ha facilitado la optimización de la producción energética, permitiendo una mejor adaptación a los distintos niveles de tensión de la red eléctrica [12]. Este modelo resulta aún más prometedor cuando se implementa utilizando fuentes de energía renovables. Entre las soluciones más destacadas se encuentran la instalación de paneles solares en fachadas y cubiertas de edificios, la colocación de aerogeneradores en azoteas y el empleo de pequeños reactores que aprovechen biomasa residual procedente, por ejemplo, del mantenimiento de jardines o parque urbanos. Estas formas de generación no solo contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también acercan la producción energética a los consumidores finales [13].

Las tecnologías de generación a pequeña escala basadas en fuentes renovables están llamadas a desempeñar un papel clave en la transición hacia sistemas energéticos más resilientes, sostenibles y adaptados a las necesidades locales. Esta descentralización puede, además, constituir una herramienta eficaz para fomentar la repoblación de zonas rurales, cada vez más despobladas en favor de los servicios y oportunidades que ofrecen las grandes ciudades. A su vez, los sistemas distribuidos aumentan la tolerancia a fallos de la red, reducen la dependencia de grandes infraestructuras y permiten disminuir los costes asociados a la distribución de energía [14].

En este marco se sitúa el trabajo de investigación y desarrollo que se presenta en esta Tesis Doctoral, cuyo objetivo es el de contribuir a la valorización energética de los residuos generados por la industria oleícola. En concreto, se proponen dos alternativas tecnológicas complementarias e innovadoras por su facilidad de uso, bajo coste y reducidas dimensiones, para el aprovechamiento del alperujo, un subproducto de dicha actividad. Por un lado, se ha diseñado un destilador solar equipado con un sistema de monitorización que permite reducir la humedad del alperujo. Esta disminución de humedad no solo mejora su *poder calorífico inferior* (PCI), incrementando su potencial como biocombustible, sino

que también reduce su peso, facilitando y abaratando su transporte a las orujeras, centros especializados donde se extrae el aceite de orujo y se seca el residuo restante para producir *orujillo* mediante procesos termoquímicos. Adicionalmente, el sistema permite recuperar parte del agua contenido en el alperujo, lo que representa un recurso valioso en regiones con problemas de sequía.

Por otro lado, se ha desarrollado un sistema de monitorización y control para un gasificador portátil, diseñado específicamente para utilizar como combustible el alperujo previamente secado. Este gasificador puede conectarse a un grupo electrógeno para la generación de electricidad, ofreciendo así una fuente de energía continua, flexible y controlable. A diferencia de otras fuentes renovables sujetas a la variabilidad climática, este sistema puede activarse en menos de treinta minutos, lo que permite mitigar los problemas asociados a la intermitencia del suministro y mejorar la sincronización entre la generación y la demanda energética.

1.2 El aceite de oliva y la problemática de sus residuos

La producción de aceite de oliva es una práctica milenaria profundamente arraigada en la cultura y economía mediterránea, alcanzando su máxima expresión en la provincia de Jaén, reconocida internacionalmente como el principal enclave oleícola del mundo. Contando con una población censada de aproximadamente 70 millones de olivos, cuya explotación permite obtener el apreciado “oro líquido”. La magnitud de esta actividad sitúa a Jaén como responsable de cerca del 20% de la producción mundial de aceite de oliva, superando incluso la producción conjunta de otros países tradicionalmente destacados en este sector, como Grecia, Portugal e Italia [15].

La evolución tecnológica ha transformado radicalmente los métodos de extracción de aceite. Atrás quedaron los sistemas tradicionales basados en la molienda mediante animales de tiro. En la actualidad, la extracción se realiza con decantadoras centrífugas, también conocidas como *decantadoras de dos fases*. Estos equipos permiten separar mezclas compuestas por sólidos y líquidos (o líquidos con diferentes densidades) en dos fases distintas: una fase líquida, correspondiente con el aceite y el agua vegetal, y una fase sólida, conocida como alperujo. En la Figura 1. 2 a) se puede visualizar el aspecto de dicho subproducto.

El funcionamiento de una decantadora centrífuga puede dividirse en cuatro etapas principales: primero, se alimenta el sistema con la mezcla; en segundo lugar, el rotor gira a gran velocidad generando una fuerte fuerza centrífuga; esta fuerza separa las partículas según su densidad, quedando la parte sólida adherida a las paredes del rotor, mientras que los líquidos se concentran en el eje central. Posteriormente, estos líquidos son descargados por acción de la gravedad,

mientras que los sólidos se extraen por la parte trasera mediante un tornillo sinfín. Este proceso continuo y eficiente ha sustituido prácticamente por completo a los métodos tradicionales.

Las zonas de descarga de las fracciones líquida y sólida pueden observarse claramente en una sección transversal de una decantadora, como la proporcionada por el fabricante Hiller, representada en la Figura 2. 1 a).

Como resultado de este proceso, se obtiene por un lado aceite de oliva virgen extra, y por otro, un subproducto semilíquido de aspecto lodoso denominado alperujo o *alpeorujo*. Este está formado por la pulpa, piel y huesos de las aceitunas, contando con una porción líquida que contiene agua (denominada *alpechín*) y parte del aceite que no se ha podido extraer al formar parte de este conglomerado de sustancias. De cada 100kg de aceitunas que se introducen en el decantador, entre 15 y 25kg acaban transformados en aceite de oliva, siendo habitual un rendimiento cercano al 20% [17], aunque este valor puede variar en función de factores como la variedad de aceituna, su grado de maduración y el proceso empleado.

El resto del material, junto con el agua de limpieza, se acumula en grandes balsas al aire libre denominadas *alpechineras* o *pozos de alperujo*, a la espera de ser procesado en las orujeras. En estas instalaciones especializadas, el alperujo se somete a una extracción química con disolventes, como el hexano, para obtener aceite de orujo. Posteriormente, el residuo sólido resultante se seca mediante secaderos rotativos, generalmente alimentados por gas natural, lo que permite obtener el llamado *orujo agotado*.

Este orujo agotado se puede revalorizar de múltiples formas: como pienso para alimentación animal, fertilizante agrícola, ingrediente en la elaboración de cosméticos o biocombustible sólido, mediante su transformación en pellets a través de peletizadoras, como los utilizados en las pruebas del gasificador y que se pueden visualizar en la Figura 1. 2 c). Además, investigaciones recientes han demostrado el potencial del orujillo como materia prima para la producción de bioplásticos y otros materiales de interés industrial [17]. Estos desarrollos reflejan el potencial de este subproducto para integrarse en estrategias de *economía circular*, contribuyendo así a minimizar el impacto ambiental de la actividad olivarera y a diversificar su cadena de valor.

1.2.1 Alambique solar como agente de reducción de la dependencia de los combustibles fósiles

El cuidado y mantenimiento de los pozos de alperujo representa una de las principales problemáticas asociadas a la industria oleícola, debido a la enorme cantidad de residuo que se genera durante la elaboración de aceite de oliva, como se puede visualizar en la Figura 1. 2 b). Este volumen implica elevados costes de gestión, que recaen directamente sobre las almazaras. A este problema

económico se suma el importante impacto ambiental que supone el alperujo, cuyo carácter ácido y altamente orgánico lo convierte en un residuo potencialmente contaminante si no se gestiona adecuadamente.

En caso de filtraciones desde las alpechineras, existe un alto riesgo de que los compuestos lixiviados alcancen los acuíferos, afectando la calidad del agua subterránea. Además, su infiltración en el suelo puede alterar el pH y aumentar la salinidad, afectando negativamente a la fertilidad del terreno. Las precipitaciones agravan este fenómeno, favoreciendo la lixiviación de compuestos fenólicos y otras sustancias contaminantes hacia el medioambiente debido a la acumulación del alperujo al aire libre [17].



Figura 1. 2 a) Alperujo suministrado para su secado en la primera propuesta. b) Dimensiones de las piscinas de alperujo en una orujera. c) Pellets de orujillo utilizados en la segunda propuesta.

Como propuesta para disminuir la dependencia de combustibles fósiles en el proceso de secado del alperujo, así como para reducir los costes de gestión y transporte, se ha desarrollado un prototipo de *alambique solar*. Este equipo permite reducir significativamente el contenido de humedad del alperujo mediante energía solar, lo que se traduce en un menor consumo de gas natural durante el proceso de secado en las orujeras, además de facilitar el transporte al reducir el peso del subproducto.

El diseño del sistema incorpora un vidrio con bajo contenido en hierro, que genera un punto frío en su superficie. Gracias a este gradiente térmico, el vapor de agua generado durante la exposición solar se condensa en el vidrio, permitiendo así recuperar parte del agua contenida en el alperujo. Esta agua condensada puede ser reutilizada en diversas aplicaciones, como el riego agrícola, lo cual representa un recurso estratégico especialmente en regiones con climas cálidos y escasez de agua, como es la cuenca mediterránea.

1.2.2 Bioenergía y producción de hidrógeno verde: sinergia para una transición energética sostenible

La bioenergía, entendida como la energía renovable derivada de la biomasa, constituye una de las alternativas más prometedoras en el contexto de la transición energética global. Esta fuente de energía se considera neutra en carbono, en tanto que el dióxido de carbono (CO_2) emitido durante su conversión

o combustión corresponde al carbono captado previamente en la fotosíntesis de las plantas, cerrando así el ciclo [18].

La biomasa se define como la fracción biodegradable de residuos de origen animal o vegetal, derivada de actividades agrícolas, forestales y de industrias conexas como la pesca o la acuicultura [19]. Tradicionalmente en la producción de energía mediante biomasa se utiliza un *ciclo Rankine convencional* utilizando vapor de agua como fluido de trabajo. No obstante, el rendimiento de este proceso puede verse limitado por la disipación de calor residual a la atmósfera, comúnmente a través de torres de refrigeración de hormigón [20]. En este sentido las plantas de cogeneración modernas han optimizado dicho proceso al reutilizar ese calor para usos industriales o calefacción, incrementando significativamente su eficiencia [21].

Una alternativa destacada es la gasificación de biomasa, que cuando se utiliza aire como agente gasificante se obtiene un gas combustible, conocido como *gas pobre*. Este gas contiene hidrógeno, monóxido de carbono y metano, lo que permite su uso en motores de combustión interna o turbinas de gas. Además, como subproducto se genera *biochar*, un material carbonoso que aplicado al suelo mejora la retención de agua, representando una estrategia adicional en el secuestro de carbono [22].

En paralelo al desarrollo de tecnologías basadas en biomasa, el hidrógeno se perfila como un vector energético clave para descarbonizar sectores de alta demanda de energética. La distinción entre *hidrógeno gris* (producido a partir de combustibles fósiles sin captura de CO₂) e *hidrógeno verde* (generado mediante energías renovables) es fundamental. Según datos del año 2021, el *hidrógeno gris* representaba el 96% de la producción mundial, mayoritariamente generado a partir de reformado de gas natural (78%) y gasificación de carbón (18%) [23].

Con el objetivo de revertir esta tendencia, iniciativas como la *Agenda 2030* de Naciones Unidas han impulsado políticas orientadas a la producción sostenible de hidrógeno. En este marco destaca el *Valle Andalúz del Hidrógeno*, el mayor proyecto europeo de hidrógeno verde, que prevé la instalación de 2GW de capacidad en instalaciones próximas a las refinerías de Palos de la Frontera, Huelva y San Roque, Cádiz [24]. Este tipo de proyectos representa un claro compromiso por la descarbonización, aunque enfrentan retos logísticos relacionados con el transporte y almacenamiento del hidrógeno.

Es aquí donde la producción descentralizada juega un papel relevante, especialmente cuando se considera el uso de gasificadores de biomasa de pequeña escala a nivel local. Esta opción no solo reduce la dependencia de infraestructuras como gaseoductos o tanques presurizados, sino que permite aprovechar recursos residuales disponibles en el entorno inmediato, fortaleciendo la red eléctrica [21].

La conjunción de bioenergía y producción de *hidrógeno verde* (particularmente mediante tecnologías de gasificación) representa una sinergia tecnológica con gran potencial para avanzar hacia un modelo energético más limpio, autónomo y sostenible. El respaldo político, institucional y empresarial resulta crucial para consolidar este cambio de paradigma en las próximas décadas. Dicho apoyo se puede apreciar en el aumento de la producción mediante métodos renovables, lo cual registra la EIA en la Figura 1. 3.

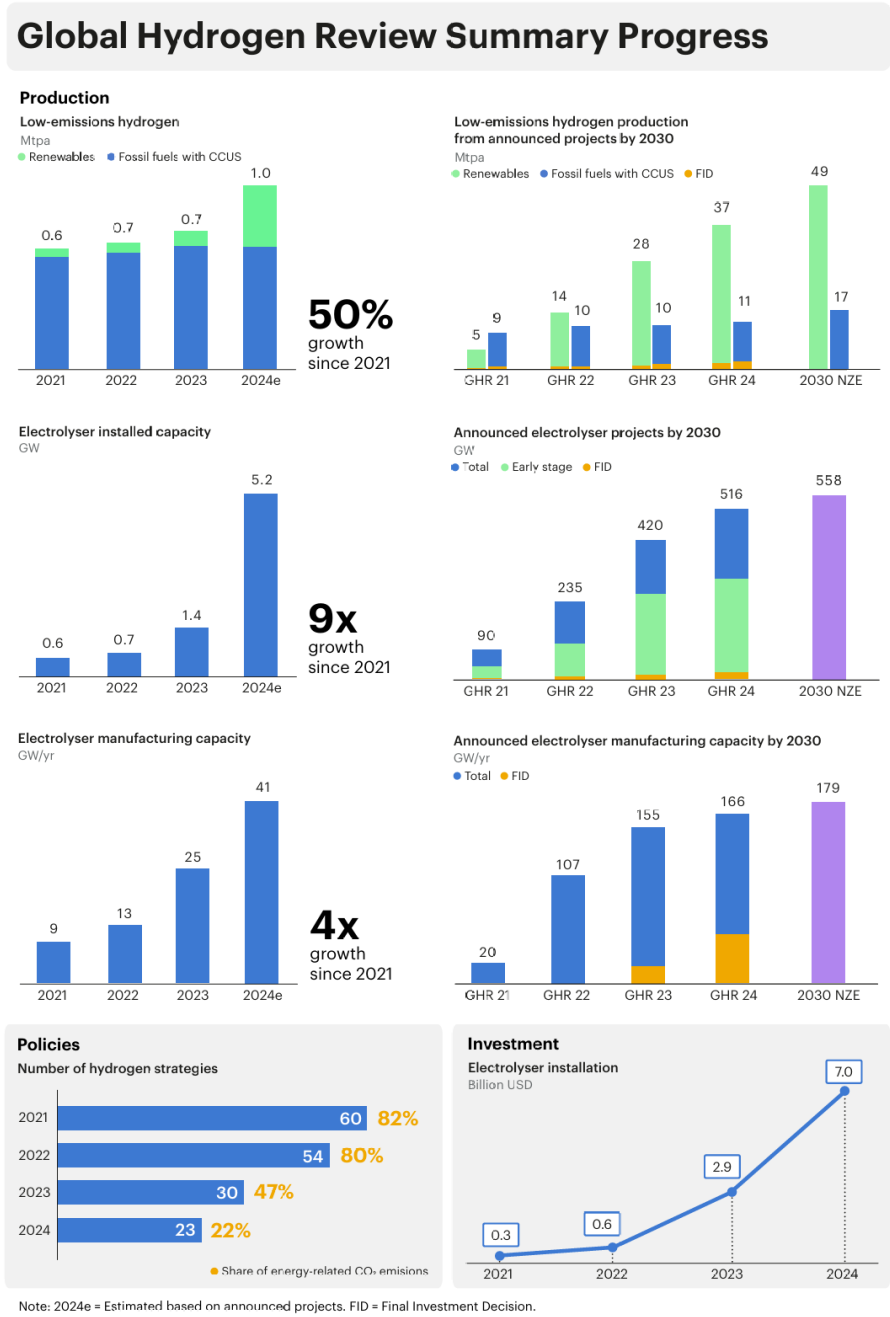


Figura 1. 3 Tendencia en la producción de hidrógeno según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [25].

1.3 Alcance y objetivos de la Tesis Doctoral

El desarrollo de esta tesis ha buscado como objetivo principal proponer alternativas para la revalorización energética de los desechos forestales y agrícolas, todo ello mediante el diseño e implementación de sistemas de monitorización y control remoto con una interfaz que sea fácilmente entendible para el usuario final. El uso de microcontroladores y componentes de bajo coste y consumo podría suponer un cambio de paradigma en la sensorización del sector agrícola, permitiendo optimizar la producción y la incorporación de este sector a la filosofía DIY (hazlo por ti mismo, en inglés), lo que puede originar alternativas aún más interesantes.

Para lograr esas metas globales se ha realizado un desglose de propuestas que permiten demostrar el potencial de ideas realizables con un presupuesto reducido, pero con mucha aplicabilidad y escalabilidad, cuyos objetivos y alcance más específicos se detallan a continuación:

1.3.1 Secadero o alambique solar

La finalidad principal es el diseño y análisis de un dispositivo que actúe como complemento al proceso de secado del alperujo mediante secaderos rotativos, los cuales dependen habitualmente de combustibles fósiles, con el fin de reducir su humedad de forma más sostenible.

Más concretamente, el proyecto busca desarrollar un prototipo que permita aprovechar fuentes de energía renovables, como es el caso de la energía solar, para contribuir a la reducción del consumo energético y el impacto ambiental. Para alcanzar este propósito general, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- **Diseñar un sistema pasivo** capaz de reducir la humedad de los residuos de biomasa agroindustrial del sector oleícola permitiendo, además, la captación de parte del agua evaporada con fines de regadío. Este sistema debe funcionar sin aportaciones energéticas externas, salvo la energía generada por un pequeño panel solar, que también actúa como sensor de radiación solar, y sin necesidad de partes móviles, con el objetivo de minimizar costes y mantenimiento.
- **Desarrollar e implementar un sistema de monitorización y control**, basado en hardware específico, diseñado para operar en condiciones ambientales extremas. El sistema ha de ser capaz de resistir un rango térmico amplio, desde temperaturas nocturnas cercanas a 0°C hasta temperaturas diurnas que superen los 70°C, así como soportar la exposición a ambientes corrosivos generados por el carácter ácido del alperujo.
- **Analizar el desempeño del sistema** mediante la comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los datos meteorológicos

locales, a fin de evaluar su precisión, eficiencia y confiabilidad operativa.

- **Verificar la robustez del conjunto formado por el alambique solar y el sistema de monitorización**, tanto en operación remota como local, comprobando su capacidad de funcionar de manera estable en diferentes modalidades de uso.
- **Implementar una interfaz gráfica de usuario (GUI)** que permita una interacción intuitiva, facilitando el acceso, visualización y gestión de los datos recogidos durante el funcionamiento del sistema.
- **Estudiar el comportamiento a largo plazo del prototipo de alambique solar**, evaluando su funcionamiento y desgaste durante un periodo prolongado de operación continua bajo distintas condiciones ambientales, con el fin de determinar su durabilidad y estabilidad estructural.

1.3.2 Modelado del alambique solar mediante dinámica de fluidos computacional y aprendizaje profundo

Este estudio tiene como propósito principal validar el modelado térmico del prototipo de alambique solar desarrollado previamente para el secado de residuos agroindustriales. Con esta alternativa se permitiría realizar iteraciones en el diseño sin incurrir en la construcción de cada alternativa, lo que reduce costes y tiempos de espera. Para ello, se emplean los datos reales obtenidos empíricamente, combinando modelado computacional basado en *dinámica de fluidos* con algoritmos de *aprendizaje profundo*, con el fin de evaluar el rendimiento del sistema y explorar vías de mejora.

Concretamente, los objetivos específicos son los siguientes:

- **Realizar la monitorización remota de las condiciones ambientales**, tanto internas como externas del alambique solar, con el fin de disponer de un conjunto de datos fiables para su análisis y para la calibración de los modelos orientados a la optimización del sistema.
- **Caracterizar el funcionamiento del prototipo** mediante datos experimentales, poniendo especial énfasis en la influencia de la velocidad del aire en la distribución térmica dentro de la cámara de secado, lo cual resulta crucial para entender la dinámica del proceso de deshidratación.
- **Desarrollar un modelo predictivo basado en redes neuronales artificiales**, utilizando como entradas los valores registrados por los sensores de temperatura, humedad relativa y radiación solar.
- **Validar el modelo de aprendizaje profundo** mediante la comparación con datos reales de operación del sistema, garantizando la fiabilidad de las predicciones generadas.

- **Analizar la variabilidad térmica interna y externa** con el objetivo de explicar las fluctuaciones observadas y su relación con las condiciones ambientales y parámetros operativos.
- **Identificar las variables más influyentes** en el modelo predictivo, evaluando su impacto en el comportamiento térmico del sistema y en la eficacia del proceso de secado.
- **Evaluar la veracidad y aplicabilidad del modelo de simulación**, determinando si puede utilizarse como sustituto parcial de la experimentación física para el desarrollo y optimización de futuros diseños.
- **Comprobar la utilidad del modelo integrado para la generación de estrategias de control** que mantengan las temperaturas dentro del rango óptimo de secado, evitando sobrecalentamientos o pérdidas de eficiencia. Esto incluye la posibilidad de utilizar el modelo en sistemas que ajusten dinámicamente parámetros como los caudales de aire o la orientación de los colectores solares.
- **Aplicar un enfoque innovador que combine CFD y Deep Learning**, con el objetivo de establecer una metodología robusta para la simulación y optimización de sistemas de deshidratación solar.

1.3.3 Gasificador de biomasa para la generación de gas producto

El presente trabajo tiene como finalidad el diseño, implementación y validación de un sistema compacto de gasificación de biomasa, concebido para la generación de gas producto utilizable como fuente de energía en aplicaciones que requieran de movimiento o aisladas de la red. La investigación abarca tanto el desarrollo del reactor como la integración de un sistema de monitorización y control inteligente, orientado a mejorar la eficiencia, la portabilidad y la estabilidad operativa del conjunto.

Los objetivos específicos que guían este trabajo son los siguientes:

- **Diseñar un gasificador de biomasa compacto y de fácil mantenimiento**, capaz de generar gas producto a partir de residuos orgánicos. Tras someterlo a etapas de acondicionamiento térmico y depuración, este gas ha de ser apto para su uso como combustible en un grupo electrógeno destinado a la producción portátil de electricidad.
- **Desarrollar e implementar un sistema de monitorización y control remoto de bajo consumo**, basado en una placa de circuito impreso (PCB) diseñada específicamente para el proyecto. Este sistema ha de gestionar energéticamente al conjunto, adaptando el voltaje de la batería de gel a los niveles de voltaje requeridos por los distintos componentes y periféricos del sistema.

- **Supervisar y controlar en tiempo real el funcionamiento del gasificador**, utilizando sensores industriales preparados para operar en condiciones exigentes, garantizando la fiabilidad de las lecturas.
- **Calibrar en laboratorio los sensores del sistema**, asegurando su precisión mediante procedimientos estandarizados, y **diseñar un tubo de Venturi personalizado** mediante impresión 3D, optimizado dimensionalmente para permitir la medición precisa de los caudales de entrada y salida del sistema.
- **Establecer un sistema de control intuitivo**, que facilite la puesta en marcha y estabilización operativa del gasificador. El sistema ha de permitir la visualización en tiempo real, el almacenamiento local y el acceso remoto a los datos, así como la modificación dinámica del algoritmo de control durante la operación. Además, de contar con capacidad de recibir actualizaciones OTA (Over-the-Air), lo que asegura su fiabilidad ante desconexiones temporales.
- **Gestionar y analizar los datos obtenidos durante diversos ciclos de arranque y funcionamiento**, comparando los resultados experimentales con los valores teóricos y datos disponibles en la literatura científica. Esto permitía validar el rendimiento global del sistema y verificar su reproducibilidad bajo distintas condiciones de uso.

1.4 Contribuciones científicas

A continuación, se aporta un listado de los artículos científicos realizados durante el transcurso de esta Tesis Doctoral en orden cronológico:

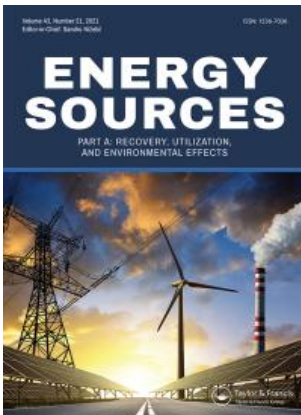


A1. **A. Rodríguez**, R. Aguado, M. Sánchez, D. Vera, J.A. Gómez

Experimental validation of a wireless monitored solar still for efficient olive pomace drying and distilled water production.

Drying Technology, vol 41, no 11, 1841-1858, 2023

DOI: 10.1080/07373937.2023.2198294

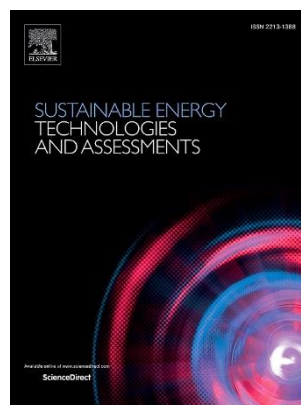


A2. J. Cabrera, D. Vera, F. Jurado, M. Córdova, G. Santillán, **A. Rodríguez**, R. Cabrera

Optimization of olive pomace dehydration process through the integration of computational fluid dynamics and deep learning.

Energy Sources, Part A. Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol 46, no 1, 4756-4776, 2024

DOI: 10.1080/15567036.2024.2331563



A3. **A. Rodríguez**, M. Sánchez, R. Aguado, J.A. Gómez, D. Vera, D.A. López

Low-cost real-time monitoring and automated control system for a bench-scale portable downdraft gasifier.

Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol 80, 104344, 2025

DOI: 10.1016/j.seta.2025.104344

1.5 Estructura de la Tesis Doctoral

La presente Tesis Doctoral aborda el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de monitorización energética y control, para la industria agroalimentaria, con especial atención a los subproductos de la producción de aceite de oliva. La investigación se centra en la creación y optimización de tecnologías compactas, eficientes y fácilmente replicables, como gasificadores de biomasa acoplados a sistemas de generación eléctrica y/o alambiques solares monitorizados, incorporando redes de sensores y control de bajo consumo. Estas soluciones no solo permiten el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales, sino que también ofrecen un marco extrapolable a otros sectores con problemáticas similares de gestión de residuos y necesidades de generación distribuida.

La estructura del trabajo se organiza en siete capítulos, agrupados en cinco bloques temáticos que abarcan desde los fundamentos teóricos y el estado del arte, hasta el desarrollo experimental, la validación funcional de los prototipos y el análisis de resultados frente a modelos y bibliografía especializada:

- i. La primera parte se compone del [capítulo 1](#) y el [capítulo 2](#), en los cuales se realiza una pequeña introducción, descripción del alcance y objetivos del trabajo, una detallada revisión bibliográfica dedicada al sector de la bioenergía enmarcada en el sector de la industria de producción de aceite, así como una revisión de las tecnologías de secado y gasificación de biomasa.
- ii. La segunda parte abarca al [capítulo 3](#) y al [capítulo 4](#), en los cuales se presentan los resultados de la investigación sobre la elaboración de un alambique solar, el cual además de reducir la humedad de las muestras de alperujo (un lodo espeso compuesto por los residuos de la producción de aceite de oliva) permite capturar dicha humedad para utilizarse para riego.
- iii. La tercera parte se compone del [capítulo 5](#). En el cual se aborda el estudio y ensayos realizados en un gasificador de lecho fijo de flujo descendente; cerrando el ciclo de aprovechamiento de los residuos de la olivicultura, al crear una fuente de energía económica, fácil de operar y portátil.
- iv. La cuarta parte se corresponde con el [capítulo 6](#), el cual presenta un resumen general de los resultados obtenidos, así como las conclusiones del estudio y una propuesta de líneas de investigación futuras.
- v. Conjunto completo de las referencias encontradas en el documento recogidas en el [capítulo 7](#).

A continuación, se presenta una breve descripción de cada capítulo:

Capítulo 1: Establece el marco conceptual y contextual que sustenta la Tesis Doctoral, al tiempo que presenta una visión sintética y estructurada de la organización interna y los contenidos que articulan el desarrollo del documento

Capítulo 2: Este capítulo ofrece una revisión exhaustiva del sector de la bioenergía en el marco de la transición energética global hacia un modelo basado en fuentes con bajas emisiones de dióxido de carbono, poniendo especial énfasis en el aprovechamiento de recursos de biomasa agroindustrial procedentes del sector oleícola. Asimismo, se presenta un análisis detallado de la literatura científica relacionada con distintas estrategias de modelización y optimización, incluyendo el empleo de *dinámica de fluidos computacional*, técnicas de *aprendizaje profundo*, así como estudios previos sobre tecnologías de gasificación y los distintos tipos de secaderos solares empleados en procesos de valorización energética.

Capítulo 3: En este capítulo se presenta la primera propuesta para valorizar los residuos derivados de la producción de aceite de oliva: un *alambique solar*. Este dispositivo es un prototipo de secadero solar indirecto, diseñado específicamente para reducir la humedad del alpeorujo y, al mismo tiempo, recuperar parte del agua evaporada para almacenarla en un depósito. A lo largo del capítulo se detallan sus principales características físicas, como las dimensiones y los materiales seleccionados, y se analiza el sistema que lo controla, tanto el hardware como en el software necesarios para monitorizar su funcionamiento. Finalmente, se evalúa el rendimiento del prototipo en condiciones reales, valorando tanto su resistencia y eficacia, como la utilidad de la interfaz gráfica y del sistema de recogida de datos.

Capítulo 4: Este capítulo explora el uso de técnicas de simulación y aprendizaje profundo para optimizar el proceso de secado del alpeorujo, evitando estudios prolongados con múltiples ensayos físicos. A partir del prototipo presentado en el capítulo 3, se simulan distintas alternativas utilizando datos reales, lo que permite predecir resultados y proponer mejoras. Finalmente, se determina la velocidad óptima del aire forzado para maximizar la eficiencia del secado.

Capítulo 5: Este capítulo presenta el diseño y evaluación de un gasificador de biomasa portátil como segunda propuesta tecnológica. Se analiza su comportamiento en funcionamiento y se comparan los resultados con referencias bibliográficas. El sistema incorpora un software que permite visualizar datos en tiempo real, almacenar información y controlar el proceso de forma manual o automática mediante un algoritmo flexible, que puede modificarse sin detener la planta y ajustar el punto de operación según sea necesario.

Capítulo 6: Este capítulo cierra el trabajo realizado con una síntesis de las principales contribuciones y objetivos alcanzados, destacando el desarrollo de soluciones innovadoras para el aprovechamiento de subproductos oleícolas. Se pone en valor la viabilidad de tecnologías sostenibles como el alambique solar y el gasificador de biomasa, así como el uso de simulación y *Deep Learning* para optimizar procesos. Finalmente, se esbozan líneas de investigación futuras orientadas a mejorar la eficiencia energética, automatizar procesos y escalar las soluciones propuestas, consolidando así nuevas vías para una gestión más responsable y circular de los residuos agrícolas.

Capítulo 7: Conjunto que engloba todas las referencias utilizadas en el presente documento.

Capítulo 2

Estado de la técnica

2.1 La industria oleícola, producción de aceite de oliva y aprovechamiento de residuos

La producción de aceite de oliva, concentrada principalmente en la cuenca mediterránea debido a las condiciones climáticas favorables para el cultivo del olivo, posiciona a España como responsable de aproximadamente el 60% del volumen global de aceite de oliva [26]. Con el tiempo, la aparición de nuevos métodos de producción ha generado no solo mejoras en la eficiencia, sino también ha dado lugar a diversos subproductos y residuos cuya gestión representa importantes retos ambientales, al tiempo que abre oportunidades en el ámbito energético.

Desde la década de 1960, se ha implementado el *sistema de extracción continua en tres fases*, que permite obtener aceite de oliva virgen extra, aceite de oliva y orujo como productos separados, siendo este último una mezcla con una humedad de aproximadamente del 45%. Posteriormente, en los años noventa, se introdujo un *método bifásico* más eficiente, que produce únicamente aceite de oliva y alperujo como resultado de la decantación centrífuga horizontal [27], [28]. En la actualidad, más del 90% de las almazaras en España operan mediante este sistema bifásico [29]. En la Figura 2. 1 se muestra las diferencias constructivas de los decantadores de dos y tres fases.

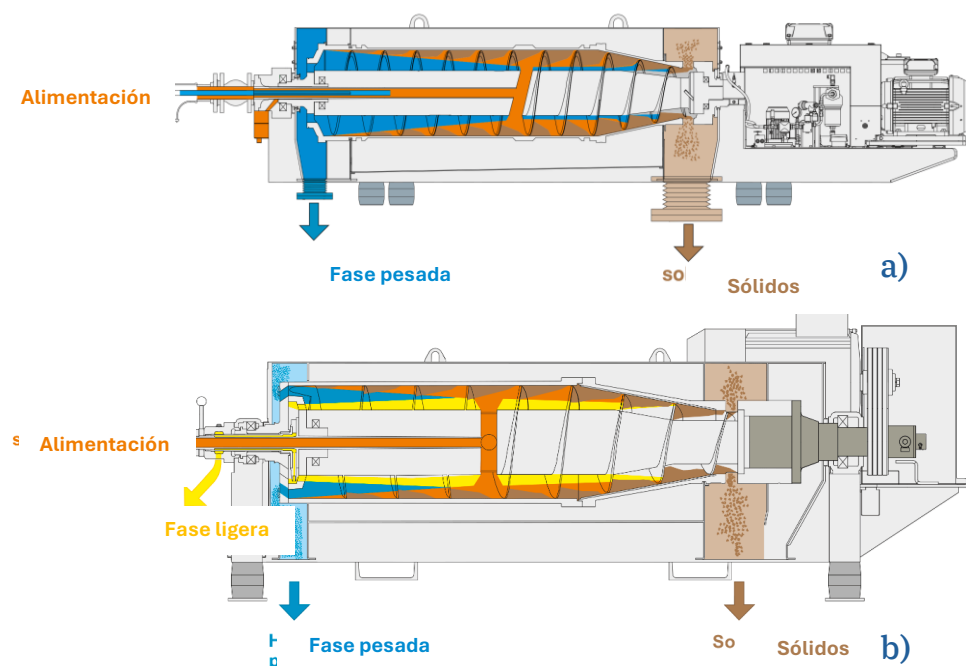


Figura 2. 1 Secciones transversales de un decantador de dos fases a) y uno de tres fases b) [16].

Uno de los principales subproductos generados en el proceso de extracción de aceite de oliva es el orujo de aceituna, también conocido como alperujo. Este material representa un desafío de primer orden para las almazaras, debido a su elevada tasa de producción, su potencial contaminante y los altos costes asociados a su tratamiento [30]. El alperujo se presenta como un lodo de consistencia espesa, con un alto contenido de humedad (60-70% en base húmeda) [31], [32], [33]. Está constituido por una mezcla de fragmentos de piel, pulpa y hueso de aceituna, y contiene entre un 2% y 4% de aceite residual en peso [31]. Este aceite conocido como *aceite de orujo de oliva*, puede ser recuperado mediante procesos químicos.

Sin embargo, las características fisicoquímicas del alperujo, especialmente su alto contenido de humedad y su pH ácido (alrededor de 5.4), dificultan significativamente su manipulación, almacenamiento, transporte y secado, debido a su elevada fluidez y baja estabilidad [37]. Se estima que por cada tonelada de aceitunas procesadas se generan cerca de 850 kilogramos de este residuo [32], lo que subraya la necesidad de avanzar en estrategias sostenibles para su gestión y valorización dentro de un modelo de *economía circular*.

La práctica más extendida para la gestión del alperujo consiste en su transporte a las plantas especializadas en la extracción de aceite de orujo de oliva. En estas instalaciones, se lleva a cabo una recuperación del aceite residual mediante procesos mecánicos y químicos. Como paso previo, el orujo húmedo debe someterse a un proceso de secado intensivo, generalmente realizado en secaderos de tambor rotativo de funcionamiento continuo y a gran escala [32], [34], [35].

Estos secaderos emplean habitualmente gas natural como fuente de energía térmica, lo que representa un elevado coste operativo, especialmente en el contexto actual de creciente volatilidad de los mercados y encarecimiento del precio de los combustibles fósiles. El funcionamiento típico de estos equipos implica que los gases de combustión calientes, generados en la cámara de combustión, fluyen a través del tambor en la misma dirección que el material a secar (flujo paralelo) [36].

Una vez seco, el orujo se somete a un proceso de extracción sólido-líquido, en el que se emplea un disolvente orgánico, comúnmente hexano, para obtener el aceite de orujo crudo. Este proceso genera un nuevo subproducto conocido como *orujillo de aceituna agotado* [34]. El orujillo se caracteriza por su bajo contenido de humedad (aproximadamente del 10-15%) y por su potencial como biocombustible sólido, con un poder calorífico medio de alrededor de 4200 kcal/kg (17.5 MJ/kg) en base seca [35], [37].

La Figura 2. 2 proporciona una visión gráfica de las diferentes entradas y salidas en el proceso de producción de aceite de oliva.

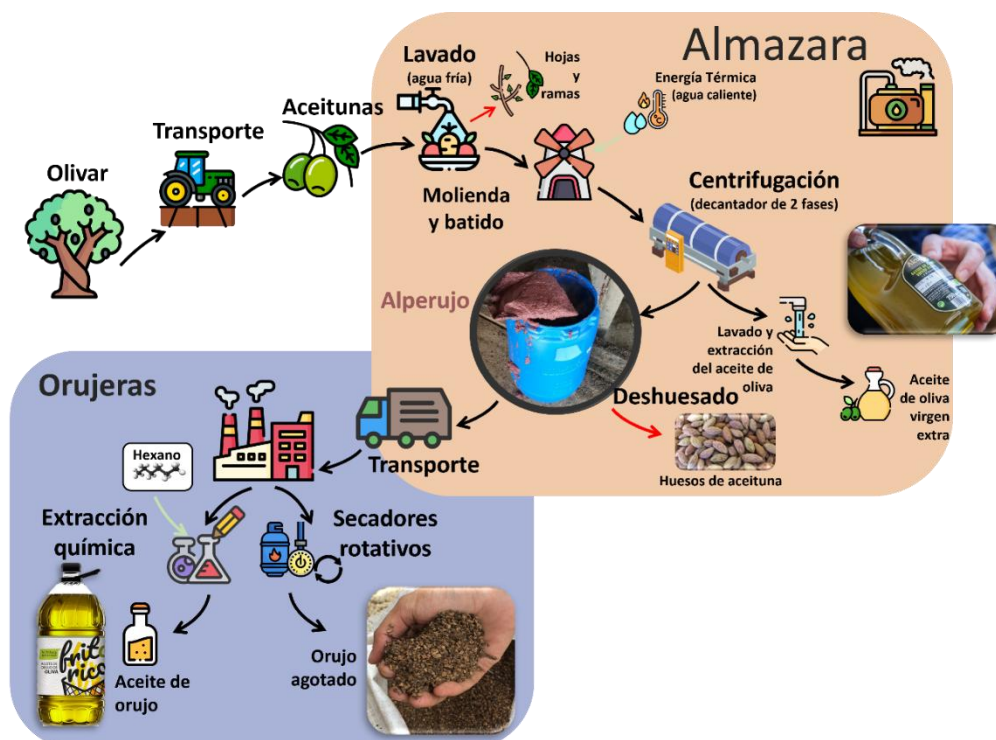


Figura 2. 2 Productos y subproductos de la industria del aceite de oliva.

Una correcta deshidratación del orujo de aceituna no solo contribuye a mitigar su impacto ambiental (al reducir significativamente su volumen, toxicidad y carga contaminante), sino que además permite transformar este subproducto en una fuente de energía renovable de alto valor. Esta conversión representa una estrategia clave para la sostenibilidad del sector oleícola, al transformar un subproducto problemático en un residuo energético útil. En este contexto, la optimización de los procesos de secado se vuelve esencial para maximizar el aprovechamiento energético del orujo y fomentar un modelo de *economía circular*.

Con base en esta premisa, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un prototipo de alambique solar de bajo coste, concebido como una solución complementaria a la etapa de secado convencional, que actualmente se realiza mediante secaderos de tambor rotativo continuo. La incorporación de esta tecnología solar permitiría reducir el contenido de humedad de orujo de forma previa o paralela al secado industrial, disminuyendo así el consumo de gas natural y, en consecuencia, los costes energéticos asociados al tratamiento del residuo.

2.2 El secado al sol, tipologías de secaderos solares

El secado es una práctica muy extendida en la industria agroalimentaria, ya que reduce la aparición de enfermedades y plagas, además de favorecer la conservación del producto y reducir el deterioro de los alimentos [38], [39]. De ahí que esta práctica haya sido estudiada con multitud de pruebas y se haya aplicado

a diferentes comestibles. Tradicionalmente, el secado de los alimentos se realizaba exponiendo los alimentos al sol. Pero a escala industrial, el secado pronto pasó a estar dominado por los combustibles fósiles, lo que implicó un aumento de la producción y una reducción de la superficie requerida para el proceso de secado. En la actualidad, debido a la creciente preocupación por salvaguardar el medio ambiente de los efectos adversos del cambio climático desencadenados por las emisiones de gases de efecto invernadero, junto con la tendencia creciente en el coste de los combustibles fósiles, se han buscado diferentes alternativas para mejorar el rendimiento de los procesos de secado con el aporte de conocimiento y tecnologías innovadoras. Los secaderos solares, también llamados *destiladores solares*, se clasifican en función de cómo incide la radiación solar y cómo circula el aire, teniendo radiación directa, indirecta o mixta, y convección natural o forzada del aire [39], [40], [41], de forma resumida se pueden clasificar como aparece en la Figura 2. 3. Ekechukwu et al. [42], [43] revisaron diversos tipos de secaderos solares, que utilizan radiación directa, indirecta o mixta, demostrando que los secaderos de convección forzada son más efectivos que los que utilizan circulación natural, aunque su coste es prohibitivo para aplicaciones pequeñas.

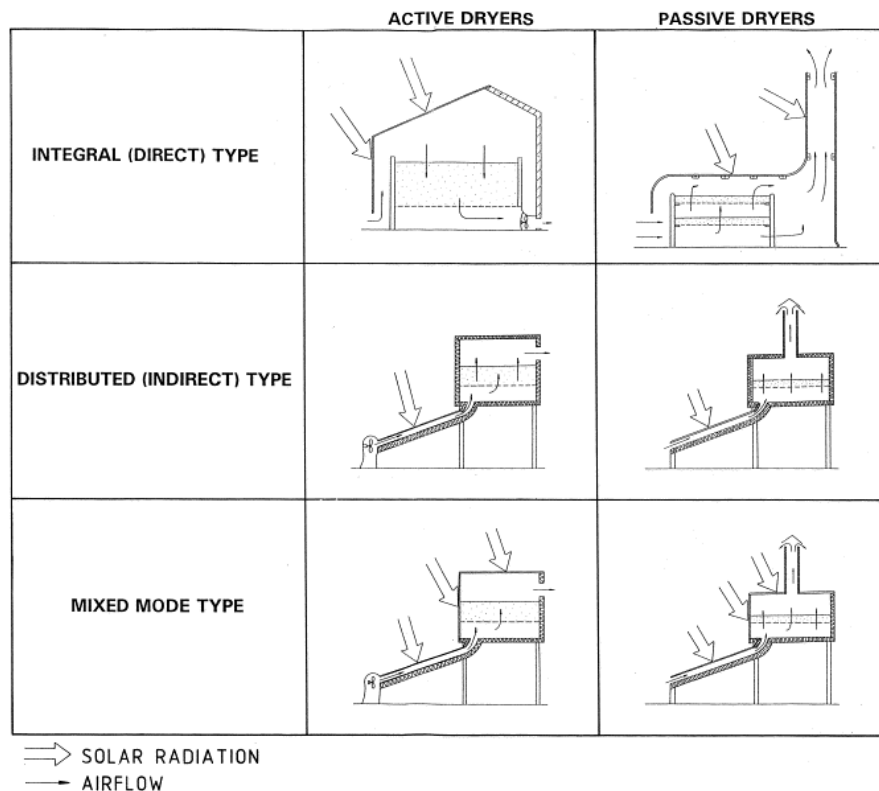


Figura 2. 3 Tipologías de secaderos solares [44].

2.2.1 Secaderos solares directos

En este proceso, la radiación incide directamente en el producto para que se seque, de modo que la humedad del producto es absorbida por el aire que lo rodea. En estos casos, es necesario mover la sustancia a secar para distribuir la

humedad. A lo largo de los años, se han propuesto diferentes estudios y alternativas para este tipo de secado. Sharma et al. investigaron experimentalmente tres tipos diferentes de secaderos solares, basados en la convección natural y forzada [45]. Sus resultados indican que los secaderos solares de tipo gabinete basados en convección natural son muy adecuados para secar pequeñas cantidades de frutas y verduras, lo que los hace apropiados para el hogar. Para grandes cantidades, para escalas que van desde el hogar hasta la industrial, o la granja, se puede considerar un tipo de secadero automático múltiple indirecto. El tipo de producto que se está secando también puede afectar el rendimiento del secadero. Un estudio realizado por Sehery et al. [46] comparó el rendimiento de los diferentes tipos de secaderos al secar uvas, higos, tomates y cebollas. Para un secadero de modo mixto, las uvas con una humedad inicial del 83% se secaron hasta un contenido de humedad del 30%, a una temperatura promedio de 55°C, en 4 días, mientras que el secado natural reduce la humedad hasta el 57% en el mismo período, a una temperatura promedio de 27°C. Para un secadero solar de modo indirecto, en un período de 8 días, el contenido de humedad pudo reducirse a tan solo un 16.5%, mientras que, en la misma duración de secado, el secado natural redujo el contenido de humedad al 43%. Otros factores que influyen en el rendimiento del secadero solar es la combinación del tipo de secadero solar y el flujo de aire. Castillo-Téllez et al. [47] realizaron un trabajo experimental sobre el secado de hojas de estevia, reduciendo su humedad de un valor inicial de 80% a un valor final de 10% en 9 a 10 horas. Sus experimentos se llevaron a cabo utilizando un secadero solar de tipo directo bajo convección natural y forzada, así como un secadero solar de tipo indirecto. Llegaron a la conclusión de que el secadero solar de tipo indirecto es más efectivo debido a su tiempo de secado y sus condiciones de operación controladas. Vijaya VenkataRaman et al. [48] informaron que los productos agrícolas como el café, el tabaco, el té, las frutas, los granos de cacao, el arroz, las nueces y la madera requieren secado mediante una aplicación constante de calor lento. Es en esta categoría de secado a baja temperatura (50-60 °C), donde se centra el presente trabajo sobre el secado del orujo de aceituna.

2.2.2 Secaderos solares indirectos

En los secaderos solares indirectos, la radiación solar es captada por un colector por donde circula una determinada cantidad de aire. Este aire, que se encarga de realizar el secado por contacto del producto, se calienta y entra en la cámara de secado [49]. A su vez, dentro de los secaderos indirectos, dependiendo de la forma en que se integre el sistema colector-cámara de secado, pueden aparecer tres tipos: los indirectos, en los que la cámara de secado no permite la entrada de radiación solar; los directos, en los que la cámara recibe la radiación solar; y los mixtos, en los que la radiación puede ser recibida tanto por un colector previo como por la cámara de secado. Sharma et al. [45] presentaron el diseño y análisis de rendimiento de un secadero solar de tipo indirecto diseñado para

secar 90 kg de uvas, con una humedad inicial del 80%, hasta un valor final del 15%, en un período de 5 a 7 días.

Entre sus observaciones, se encuentra un aumento en la eficiencia del 44% al 61% a medida que aumenta el caudal másico. Además, el proceso de secado es muy rápido en las primeras horas, y la eficiencia de secado disminuye con el tiempo. Otro estudio sobre el diseño y operación de tipos directos e indirectos de secaderos solares fue realizado por ben Mabrouk et al. [50], quienes se centraron en el secado de productos agrícolas. En sus experimentos, se observa que la temperatura del producto es más alta que las temperaturas de entrada y salida del aire, de 40 °C y 27 °C, respectivamente. Los valores de eficiencia térmica anual para los tipos de secadero indirecto y directo fueron de 60% y 40%, respectivamente. Fudholi et al. [51] presentaron un secadero solar indirecto con rendimiento mejorado utilizado para secar 100 kg de hojas de aceite de palma desde un contenido de humedad inicial del 60% hasta un valor final del 10%, en solo 22 horas. Durante este experimento se registraron diversos parámetros, como la radiación solar, que oscila entre 96 W/m² y 1042 W/m², la temperatura del aire de la cámara de secado, que oscila entre 26 °C y 67 °C, la temperatura de entrada de la cámara de secado, con valores de 26 °C a 75 °C, la temperatura de salida, que oscila entre 25 °C y 65 °C, así como el caudal de aire, con un valor de 0.13kg/s. Los principales parámetros de rendimiento del sistema fueron una eficiencia del colector del 31%, una eficiencia de secado del 19% y una eficiencia en la recogida de humedad del 67%.

Si bien el secadero de convección forzada parece ser superior al tipo de convección natural, existe un límite en la velocidad del aire circulante. Un estudio experimental sobre este límite fue realizado por Shamekhi-Amiri et al. [52], en un secadero solar indirecto fabricado que se utilizó para analizar el rendimiento del secado de hojas de bálsamo de limón en un modo de convección forzada de doble paso. En su trabajo, se compararon dos casos: un primer caso con valores de irradiación solar de 600W/m², temperatura atmosférica de 22°C, caudal másico de 0.00615 m³/s y temperatura de salida del colector de 38°C, y un segundo caso con valores de irradiación solar de 900W/m², temperatura atmosférica de 25°C, caudal másico de 0.01734m³/s y temperatura de salida del colector de 68°C. Los resultados mostraron un aumento del 20% en la eficiencia del colector desde el primer hasta el segundo caso. Sin embargo, si el caudal másico se incrementaba aún más a 0.034378 m³/s, se obtenía un efecto adverso.

2.2.3 Secaderos solares de modo mixto

Nindo et al. [53] diseñaron y probaron un sistema que se asemeja al secado al sol utilizando un panel calefactor de infrarrojo lejano para secar arroz en bruto. Un aspecto particularmente importante en el proceso de secado fue la creación de una temperatura uniforme dentro del lecho, que se logró mediante la mezcla. Esto también redujo el daño por agrietamiento del grano, además de ayudar a

lograr un secado más rápido. Para una cama de 6 cm de espesor, el sistema fue capaz de reducir el contenido de humedad en un 0.4% por hora, que es ligeramente más rápido que el secado no mezclado de una cama de 1 cm de espesor. Otro sistema, diseñado y construido por Zomorodian et al. [54], prueba tanto el secado indirecto por convección forzada como el secado solar de modo mixto de uvas sultana que tienen un contenido de humedad inicial del 78%. En el experimento se utilizaron varios caudales de 0.085, 0.126 y 0.171 kg/s. Uno de los hallazgos de este experimento es que hubo una tasa decreciente de disminución de la relación de humedad dependiendo del caudal de aire. Baniyasi et al. [55] evaluaron el rendimiento de un secadero solar de modo mixto que incorpora almacenamiento de energía térmica. El sistema se utilizó para el secado de una muestra de albaricoque y ciruela con un contenido de humedad inicial del 86%. Logró una eficiencia de eliminación de humedad de aproximadamente el 10%, mientras que su eficiencia térmica es de alrededor del 11%. El almacenamiento térmico tiene el efecto de reducir el tiempo de secado en un 50% con la adición de un ventilador. La temperatura más alta alcanzada por el secadero fue de 65°C, mientras que su velocidad de secado más rápida fue de 2.1 g/h. De manera similar, Yassen et al. [56] desarrollaron un sistema de secado híbrido solar-térmico para el secado de chiles rojos y lograron mejorar la eficiencia de secado en un 3%, gracias a la incorporación de un secadero de recuperación. Otra configuración alternativa fue presentada por Perea-Moreno et al. [57], quienes diseñaron una estructura de invernadero para el secado de astillas de madera, con el objetivo de crear biocombustible, que fue capaz de reducir el contenido de humedad de la muestra del 50 al 20% en solo 15 días.

2.2.4 Aporte de valor de la propuesta

Aunque en la literatura se dispone de una cantidad considerable de datos sobre el diseño y el rendimiento de los secaderos solares para productos agrícolas, existen pocos estudios sobre los procesos de secado solar de residuos agroalimentarios húmedos para su uso energético [58]. Además, el prototipo propuesto se caracteriza porque la extracción de la humedad contenida en el orujo de aceituna se produce mediante la condensación de gotas de agua sobre la superficie interior de una cubierta vidriada con cierta inclinación, en lugar de la vaporización del agua mediante convección forzada. Por lo tanto, una fracción significativa de la humedad contenida en la materia prima húmeda se puede recuperar con fines de riego.

Las características de diseño del prototipo desarrollado se abordan detalladamente en la sección *Alambique solar, diseño mecánico* del capítulo 3 de este documento. En dicho capítulo se introduce la primera solución propuesta para la valorización del alperujo: un *alambique solar indirecto*.

2.3 Simulación basada en dinámica de fluidos y aprendizaje profundo para la optimización del proceso de secado

2.3.1 CFD y Deep Learning

La simulación CFD (dinámica de fluidos computacional) es una técnica computacional ampliamente utilizada en ingeniería para analizar y resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos, la transferencia de calor y los fenómenos de transporte en sistemas complejos. Al discretizar las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento de los fluidos, como las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía, la simulación CFD permite modelar y visualizar los flujos de fluidos en entornos tridimensionales. Esta herramienta proporciona información detallada sobre variables clave como velocidades, presiones, temperaturas y concentraciones, lo que permite a los ingenieros y científicos comprender mejor el comportamiento de los fluidos en diversas condiciones y optimizar el diseño y el rendimiento de los sistemas y dispositivos [59], [60].

Al mismo tiempo, el aprendizaje profundo, una rama del aprendizaje automático, ha revolucionado la capacidad de procesar e interpretar grandes conjuntos de datos, lo que permite el desarrollo de modelos predictivos con una precisión sin precedentes. Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo matemático para el procesamiento de información con una estructura similar a las conexiones en el cerebro [61]. La aplicación de las RNA en la ingeniería de alimentos representa un avance significativo en el abordaje y resolución de procesos complejos en este campo. Estas herramientas de modelado se han implementado con éxito en una amplia gama de operaciones de procesamiento de alimentos, sobresaliendo en cinco áreas clave: predicción de propiedades de alimentos, secado, modelado de procesos térmicos, análisis de crecimiento microbiano y evaluación de calidad. Gracias a su flexibilidad y complejidad, las RNA son capaces de manejar problemas de regresión con variables continuas, adaptándose dinámicamente para seleccionar el modelo de regresión óptimo, ya sea lineal, logarítmico o polinómico. En los casos en los que la precisión predictiva requiere mejoras, las RNA aprovechan sus capas ocultas para refinar y mejorar su capacidad predictiva, lo que garantiza resultados más precisos y confiables. Este enfoque adaptable y avanzado subraya el potencial transformador de las RNA en la optimización de procesos dentro de la industria alimentaria, abriendo nuevas vías para la investigación y el desarrollo en este dominio [62], [63]. Para evaluar y comparar eficazmente el rendimiento entre un perceptrón de una sola capa (red neuronal de una sola capa) y un modelo de regresión lineal, es aconsejable aplicar ambos al mismo conjunto de datos, analizando su precisión y otras métricas relevantes como el *error cuadrático medio*. Una estrategia detallada para una comparación exhaustiva consiste en segmentar el conjunto de datos en dos grupos distintos: uno para el entrenamiento y otro para las pruebas. Esta

separación permite el entrenamiento de ambos modelos, el perceptrón de una sola capa y la regresión lineal, utilizando el segmento de entrenamiento dedicado. Posteriormente, se evalúa su rendimiento con el conjunto de pruebas para determinar su efectividad. Para explorar más a fondo cómo ciertas variables afectan al rendimiento, se pueden considerar ajustes como el número de neuronas en la capa de salida del perceptrón, la función de activación seleccionada o la tasa de aprendizaje. Este enfoque no solo proporciona información sobre las capacidades y limitaciones de cada modelo, sino que también guía la optimización de sus configuraciones para mejorar los resultados predictivos.

La integración de CFD con técnicas de aprendizaje profundo representa un enfoque pionero, que ofrece una metodología robusta para abordar desafíos complejos en varios sectores, incluida la optimización de los procesos de deshidratación en la industria alimentaria. Este enfoque integrado no solo mejora la eficiencia y la precisión de los modelos predictivos, sino que también abre nuevas vías para la investigación y la aplicación práctica, estableciendo un marco sólido para el estudio de la deshidratación del orujo de aceituna. A continuación, se presentan los trabajos de investigación que se han llevado a cabo en estas áreas.

2.3.2 Cinética del secado: revisión el estado actual

Se han realizado varios estudios para comprender la cinética del secado. Existe la investigación de Meziane [64] en la que se estudió la cinética de secado del orujo de aceituna en un secadero de lecho fluidizado a diferentes temperaturas de secado de 323, 333, 343 y 353 K. Esto permitió la determinación de valores efectivos de difusividad basados en el espesor de la muestra y la temperatura del aire. Con el mismo propósito, se encuentra la investigación de Mellalou et al. [65] que valorizó los residuos de orujo de aceituna como biocombustible. En este estudio se utilizó un secadero tipo invernadero empleando métodos de secado natural, híbrido e híbrido forzado. Se identificaron las eficiencias energéticas y exergéticas del deshidratador, junto con su cinética de secado. En este prototipo, el contenido de humedad del orujo de aceituna se redujo con éxito del 54% al 4 % en peso.

También se han estudiado métodos de secado del orujo de aceituna, entre los que destaca el realizado por Vera-Candeas [66] en el que se utilizan gases de combustión interna para el secado del orujo de aceituna. Este estudio se llevó a cabo en la planta de Valoriza en Linares, donde se combinan procesos de extracción de aceite, secado de orujo de aceituna y cogeneración. El secado del residuo se realizó utilizando gases de tres motores de gas que generan electricidad; con este residuo seco, y tras la extracción del aceite de orujo restante, se alimenta una planta de biomasa compuesta por una caldera de orujo de aceituna y una turbina de vapor. Benhamza et al. [67] realizaron un estudio

para evaluar el espesor óptimo para el secado de orujo de aceituna bifásico en un secadero híbrido tipo invernadero. Los espesores trabajados son de 2, 4 y 6 cm. Se evaluó la difusividad efectiva y la cinética de secado. Las muestras de orujo bifásico redujeron su contenido de humedad del 54% al 20% en peso. Cabrera-Escobar et al. [68] analizaron el comportamiento de un secadero solar para deshidratar orujo de aceituna. Se determinó la reducción del porcentaje de humedad del orujo durante el proceso de secado, se estableció la curva de poder calorífico inferior y se realizó un *análisis elemental* de la muestra. Además, se utilizó la dinámica de fluidos computacional para estudiar los efectos de las variaciones en la altura de la cámara de deshidratación, concluyendo que la altura óptima es de 300 mm.

Estos hallazgos son fundamentales para entender el potencial energético del orujo de aceituna como biomasa y la viabilidad de utilizar un secadero solar en su deshidratación.

CFD es una herramienta importante para la optimización de procesos. Con este enfoque, se encuentra el trabajo realizado por Toghraie et al. [69]. En esta investigación se realiza un estudio numérico para analizar el efecto de diferentes parámetros geométricos en el rendimiento de las centrales solares de chimenea. Se examinan variables como la altura del colector, el radio del colector y la altura de la chimenea para comprender cómo influyen en la eficiencia y la potencia de salida del sistema. Además, se investiga la distribución de la temperatura, la velocidad del aire y la presión en función de estos parámetros geométricos. El objetivo principal es optimizar el diseño de la chimenea solar para mejorar su rendimiento y eficiencia energética. Khodabandeh et al. [59] realizaron un estudio exhaustivo sobre el proceso de secado por atomización del extracto de *Lonicerae Japonicae Flos*. El estudio se centra en la optimización del proceso de secado mediante la combinación de la dinámica de fluidos computacional con el aprendizaje por refuerzo profundo. Además, se incorpora un sistema de medición de temperatura de fibra óptica distribuida para analizar el campo de temperatura en la torre de secado. El objetivo es comprender y mejorar la eficiencia del proceso de secado por pulverización, que puede tener aplicaciones significativas en la producción de productos de calidad. Hemmat Esfe y Toghraie [60] realizaron un estudio sobre el efecto de la intensidad de la radiación solar en la productividad del agua dulce en alambiques solares equipados con un sistema de enfriamiento termoeléctrico en zonas cálidas y secas, específicamente en la provincia de Semnán, Irán. Las simulaciones numéricas se realizaron en un ambiente tridimensional, estacionario y laminar, utilizando la metodología de aire húmedo para resolver las ecuaciones de continuidad, Navier-Stokes y concentración de vapor de agua. Se estableció una relación directa entre la intensidad de la radiación solar y la tasa de producción de agua dulce, demostrando que un aumento en la intensidad de la radiación solar aumenta la cantidad de agua dulce producida. Además, se evaluó el impacto de la aplicación

de un TEC (refrigerador termoeléctrico o módulo de Peltier) en una parte del vidrio del alambique solar, observándose un aumento significativo en la producción de agua dulce debido al aumento de la convección libre generada por el aumento del gradiente de temperatura del flujo en el sistema.

Otra herramienta importante en esta investigación que ayudó a lograr el objetivo de optimizar el proceso de deshidratación es el aprendizaje profundo. En este sentido, está la investigación de Liu et al. [70] que utilizaron RNA de una sola capa y MLR, que es un método estadístico adecuado para establecer relaciones lineales entre variables de datos de entrada-salida para la intercomparación de modelos. El objetivo de la regresión lineal es determinar el método óptimo, que minimice las discrepancias cuadráticas totales entre los valores proyectados y reales. Existen varios enfoques para realizar la regresión lineal, como el uso de métodos como los mínimos cuadrados, el descenso de gradiente o la regresión de cresta. Tian et al. [71], utilizaron RNA de dos capas con funciones no lineales para predecir la conductividad térmica de nanofluidos híbridos de óxido de aluminio y óxido de grafeno en una base de agua-etilenglicol. Se utilizó el algoritmo de retropropagación para entrenar la RNA, y se determinó que una capa oculta con 10 neuronas y una función de transferencia de tangente hiperbólica era la mejor opción para minimizar el error de red. Los resultados mostraron que la RNA fue capaz de predecir con precisión la conductividad térmica de los nanofluidos en función de la concentración y la temperatura de las nanopartículas. En general, la RNA demostró ser una herramienta útil y precisa para modelar la conductividad térmica de los nanofluidos en esta investigación. Kaveh et al. [72] evaluaron el rendimiento exergético y las propiedades de secado de las cebollas en un secadero semiindustrial continuo de varias etapas utilizando redes neuronales. El estudio investigó el uso y el consumo específico de energía en el proceso de secado de rodajas de cebolla. Se analizaron diferentes parámetros de secado, como la temperatura, la velocidad del aire y la velocidad lineal de la cinta, y se utilizaron métodos inteligentes para predecir el contenido de humedad, el uso de energía, la eficiencia exergética y otras variables relacionadas con el proceso de secado de la cebolla. El objetivo era proporcionar información relevante para mejorar la eficiencia energética y optimizar los procesos de secado en la industria de procesamiento de alimentos y bioproductos.

2.3.3 Valor añadido de la propuesta

Para garantizar que el proceso de deshidratación del orujo de aceituna se lleve a cabo de forma eficiente, es importante conocer los valores óptimos de variables como la temperatura, el grosor de la capa de orujo de aceituna y la velocidad de entrada del aire a la cámara de deshidratación. Se han realizado investigaciones sobre las dos primeras variables, pero aún no se ha considerado la velocidad de entrada del aire en la cámara de deshidratación. Esta variable es importante porque la transferencia de calor que recibe el orujo de aceituna es directamente proporcional a la velocidad del aire, por lo que esta investigación

tuvo como objetivo determinar la velocidad óptima de entrada de aire en el deshidratador que permita obtener una temperatura adecuada en la cámara de deshidratación mediante la aplicación de CFD. En la investigación presentada, las RNA también se han utilizado para determinar las variables con mayor influencia en los diferentes procesos, así como para su optimización. Para la deshidratación del orujo de aceituna, ninguna investigación ha utilizado RNA para estos fines. Con esta herramienta se procesan los datos obtenidos por los sensores en el prototipo físico y se determinan las variables que influyen en la temperatura de la cámara de deshidratación. Además, se determina un modelo que permite optimizar el proceso. Para este modelo se utilizaron métricas de error, como el coeficiente de correlación, el error cuadrático medio y el error porcentual absoluto, para evaluar el modelo obtenido. Este modelo tiene las siguientes variables de entrada: radiación solar, temperatura ambiente y humedad del aire tanto en el exterior como en el interior de la cámara de deshidratación.

2.4 Gasificación y automatización del control

2.4.1 La gasificación de biomasa, tipologías de gasificadores

La industria agroalimentaria representa una fuente significativa de generación de residuos a nivel mundial, debido a las elevadas cantidades de biomasa producidas durante las actividades agrícolas y de procesamiento de alimentos. Cuando se gestiona de manera adecuada, esos residuos agroindustriales poseen un notable potencial para convertirse en un recurso valioso con fines de valorización energética, especialmente en zonas remotas donde la disponibilidad de biomasa es abundante. Una estrategia de gestión particularmente prometedora es la gasificación, que permite aprovechar estos residuos como fuente de generación descentralizada de electricidad renovable [73]. Este enfoque descentralizado resulta especialmente adecuado para las regiones rurales con población y actividades económicas dispersas, ya que proporciona una alternativa práctica para reducir la dependencia de combustibles fósiles en la electrificación mejorando la seguridad energética [74]. Además, la gasificación de residuos agroindustriales reduce la necesidad de quemar a cielo abierto, disminuyendo así los riesgos de incendios y las emisiones de gases de efecto invernadero. La producción local de energía también puede estimular el desarrollo económico, generar empleo y mejorar la calidad de comunidades rurales. Asimismo, la escalabilidad y adaptabilidad de los sistemas de gasificación los convierte en soluciones versátiles, que pueden ajustarse a las diferentes necesidades energéticas y capacidades de las diversas zonas rurales.

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica que consiste en someter una materia prima carbonosa sólida a oxidación parcial con un agente gasificante, normalmente aire, oxígeno, vapor, o combinación de estos [75], [76]. Para los sistemas de gasificación a pequeña escala diseñados para la generación de electricidad, el aire suele ser la opción preferida debido a sus ventajas

económicas [77], [78], [79]. El proceso de gasificación con aire como agente gasificante permite transformar materiales con carbono orgánico, como los residuos de biomasa agroindustrial, en un gas de bajo poder calorífico, conocido como *gas pobre*, que puede utilizarse para la generación de energía [80], [81]. Los reactores de gasificación se clasifican principalmente en gasificadores de lecho fijo, flujo arrastrado y lecho fluidizado [75], como se puede observar en la Figura 2. 4. Los de lecho fijo, a su vez, se subdividen en función del sentido de la corriente de combustible en ascendente, descendente y transversal. Los gasificadores de corriente descendente se caracterizan por un flujo descendente paralelo tanto del material sólido de alimentación como del agente gasificante. En este diseño, el agente gasificante (es decir, el aire) se introduce por debajo de la zona superior y el gas producido se extrae a través de la parte inferior del reactor.

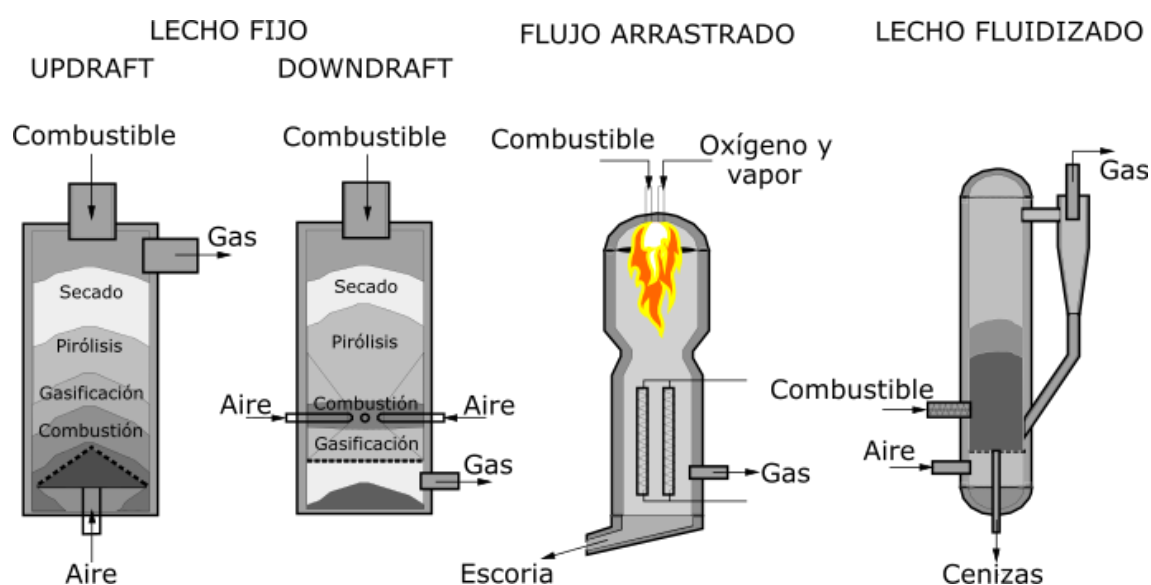


Figura 2. 4 Principales tipos de gasificadores. Adaptado de [82].

Los gasificadores de corriente descendente son la opción preferida para la generación de energía distribuida a pequeña escala debido a su construcción sencilla, funcionamiento fiable, corto tiempo de arranque (20-30 minutos), adaptabilidad a diversos biocombustibles y alta eficiencia en la conversión del carbono [75], [79], [83], [84]. Como resultado de estas ventajas, los gasificadores de corriente descendente dominan en la actualidad el mercado, especialmente en aplicaciones de generación de energía, representando aproximadamente tres cuartas partes de todos los gasificadores comercializados [85]. Además, producen menos alquitrán debido a que la zona de oxidación sigue inmediatamente a la zona de pirólisis, donde se forman estos compuestos [75]. Esta característica hace que los gasificadores de corriente descendente sean particularmente adecuados para la producción de electricidad a pequeña escala con motores de combustión interna (ICEs) [76], especialmente en aplicaciones que requieren hasta 1 MW de potencia térmica. Sin embargo, el gas producido debe ser enfriado antes de su uso debido a la alta temperatura de salida del reactor [86]. Los gasificadores de corriente descendente a pequeña escala brindan la ventaja adicional de ser

transportables en contenedores para un transporte conveniente e incluso pueden diseñarse como unidades móviles de generación de energía [84]. Estas características los hacen particularmente atractivos para la electrificación de comunidades aisladas en zonas rurales [74], [87], ya que pueden funcionar en modo fuera de la red o integrarse en microrredes sin necesidad de infraestructura eléctrica previa. Como principales inconvenientes, los gasificadores de flujo descendente generalmente exhiben un rendimiento térmico más bajo en comparación con otras tecnologías y pueden enfrentar desafíos al procesar materias primas de biomasa con alto contenido de cenizas y humedad. Los gasificadores de corriente descendente pueden subclasificarse en dos variantes de diseño principales: con garganta (también conocidos como de sección reducida) y sin garganta (también denominados de tapa abierta, de núcleo abierto o de boca abierta). La constricción en la etapa de combustión favorece el craqueo térmico de la mayor parte del alquitrán al forzar el paso de todos los productos de la pirólisis a través de una sección estrecha, mejorando así la calidad del gas producido [75], [88], [89].

El proceso de gasificación se puede dividir en cuatro etapas principales: secado o deshidratación, pirólisis o volatilización, combustión u oxidación y gasificación o reducción [75], [90], [91]. En los gasificadores de lecho fijo, estas reacciones ocurren en zonas específicas, mientras que en los gasificadores de lecho fluidizado, las reacciones pueden producirse simultáneamente en todo el reactor. Sin embargo, durante la operación real, las cuatro zonas de reacción suelen superponerse sin una separación clara o definida entre ellas [90]. En la etapa de secado, el combustible sólido alcanza temperaturas de hasta 200-250 °C, perdiendo la mayor parte de su humedad y reduciendo su contenido hasta aproximadamente un 5% [76], [92]. A continuación, ocurre la pirólisis, en la cual los enlaces químicos de la biomasa se rompen (*termólisis*) a temperaturas en el rango de 150 a 700 °C, generando productos pirolíticos (incluyendo hidrocarburos ligeros y pesados, estos últimos comúnmente conocidos como *alquitranes*) [75], [76], [91], [93]. El secado y la volatilización ocurren simultáneamente, produciendo fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. Los gases no condensables constituyen entre el 70% y el 90% del peso total de los productos [93]. En la zona de combustión, las temperaturas alcanzan valores entre 500 y 1500 °C debido a la oxidación exotérmica de los productos de la pirólisis en presencia de oxígeno [76], [94], [95]. La oxidación debe ocurrir con una cantidad limitada de oxígeno para evitar la combustión completa del combustible [93].

El calor generado en la combustión impulsa las etapas de secado, pirólisis y gasificación. Cuando se emplea aire como agente gasificante, se introducen gases inertes como el nitrógeno (N₂) y el argón (Ar) en el gas producto [93]. Finalmente, en la zona de gasificación, se forman hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) a través de reacciones de reducción de los sólidos carbonosos oxidados con los gases que fluyen aguas abajo. Este proceso endotérmico ocurre

a temperaturas en el rango de 600 a 1100 °C [75], [93], [94]. Dado que los cambios de temperatura afectan la composición del gas y la concentración de alquitrán, es fundamental un control estricto de la temperatura del proceso. Temperaturas más altas aumentan la conversión del carbono y reducen la formación de alquitrán, pero también incrementan el riesgo de sinterización de las cenizas y disminuyen el poder calorífico del gas producido [93].

2.4.2 Automatización y control en gasificadores de biomasa

Los sistemas de automatización y control para gasificadores de biomasa han avanzado significativamente en los últimos años. Los primeros sistemas de automatización se basaban en funcionalidades básicas, como la monitorización de temperatura o la implementación de controladores proporcionales-integrales-derivativos (PID) para variables de proceso específicas, lo que resultó insuficiente ante las condiciones dinámicas de la biomasa. Sagüés et al. [96] introdujeron un sistema de inferencia difusa (FIS) para controlar gasificadores, codificando el conocimiento experto en reglas del tipo "if-then". Este enfoque permitió ajustar dinámicamente parámetros del proceso, como el flujo de aire y la frecuencia de la parrilla, en función del tipo de biomasa y su contenido de humedad, mejorando así la adaptabilidad y la eficiencia del proceso. Gandhi et al. [97] desarrollaron un controlador basado en lógica difusa (FLC) para gasificadores de corriente descendente, utilizando un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) para regular la temperatura y la relación CO/CO₂. Su enfoque mejoró significativamente la estabilidad y el tiempo de respuesta en comparación con los controladores PID convencionales, demostrando la eficacia del FLC para gestionar la dinámica no lineal de la gasificación de biomasa. Gøbel et al. [98] avanzaron en el campo con un modelo matemático dinámico unidimensional que incorporaba leyes de conservación y cinética de reacción para optimizar el rendimiento estacionario e identificar estrategias de control eficientes para gestionar cambios de carga. Striūgas et al. [99] demostraron avances prácticos en automatización mediante la integración de suministros de aire por etapas, rejillas móviles y sistemas de descarga de carbón basados en presión, para gasificadores de corriente descendente diseñados para múltiples tipos de combustible. Su trabajo destacó la importancia de controlar parámetros como la presión del lecho y la temperatura para permitir una gasificación eficiente de diversas biomásas. Más recientemente, Daniel y Gandhi [100] se centraron en mejorar el rendimiento de los controladores PID para gasificadores de corriente descendente mediante técnicas de optimización por enjambre de partículas (PSO) y sistemas adaptativos de inferencia neuro-difusa (ANFIS). Sus estudios demostraron que la sintonización de PID basada en PSO y ANFIS superaba a los métodos tradicionales de Ziegler-Nichols en el control de temperatura, proporcionando una mejor respuesta transitoria y una reducción del sobreimpulso.

2.4.3 Elemento distintivo de la propuesta

A pesar de las mejoras mencionadas en el control y la optimización de los gasificadores de biomasa, aún existen numerosas oportunidades para futuras investigaciones. Una notable laguna relevante en la literatura científica es el desarrollo de sistemas de monitoreo y control automatizado más intuitivos y de bajo mantenimiento, adecuados para gasificadores portátiles de biomasa en ubicaciones remotas. Muchos de los sistemas existentes tienden a ser complejos y requieren personal especializado para su mantenimiento, lo que limita su aplicabilidad en entornos fuera de la red, donde la simplicidad y la fiabilidad son fundamentales. Además, atraer y retener a operadores cualificados para los sistemas de gasificación sigue siendo un reto importante, especialmente en las zonas rurales y, a menudo, remotas [101]. No obstante, superar estos desafíos podría desbloquear todo el potencial de las soluciones de conversión de residuos en energía para la electrificación de comunidades aisladas.

Este trabajo presenta un sistema de monitoreo intuitivo y de bajo mantenimiento para un gasificador compacto y portátil de biomasa, diseñado para la generación de energía eléctrica en ubicaciones remotas. A diferencia de los sistemas tradicionales, que a menudo son complejos y requieren operadores calificados, el sistema propuesto está diseñado específicamente para la transportabilidad, así como para la facilidad de operación y mantenimiento. Además, la unidad de control compacta (alojada en una carcasa impermeable de 250 × 250 × 100 mm) mejora la portabilidad, lo que permite una instalación rápida y una implementación flexible en diversos entornos. El sistema propuesto no solo recopila y almacena datos operativos, sino que también proporciona capacidades de monitoreo y control remoto en tiempo real, lo que permite ajustar las temperaturas de trabajo para adaptarse a diferentes tipos de biomasa. Estas características hacen que el sistema sea altamente intuitivo y fácil de usar, abordando un vacío en el mercado de gasificadores de biomasa portátiles y fáciles de operar que puedan impulsar la electrificación en áreas remotas o desatendidas.

Capítulo 3

Validación experimental de un alambique solar monitorizado de forma inalámbrica para el secado eficiente de orujo de aceituna y la producción de agua destilada

Este capítulo introduce la primera solución sostenible para la valorización del alperujo: un alambique solar indirecto. Diseñado para operar en paralelo con el secado convencional, este sistema no solo disminuye la dependencia de fuentes fósiles, sino que también permite recuperar parte del agua contenida en el alperujo, subproducto de la producción de aceite de oliva, contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos.

El trabajo se estructura en tres bloques: primero, se describe el diseño mecánico del prototipo, optimizado para deshidratar el orujo húmedo y condensar el vapor generado; en segundo lugar, se aborda el desarrollo del sistema electrónico: sensores, instrumentación y circuito de adquisición de datos que permiten monitorear en tiempo real las condiciones del proceso; por último, se analiza el firmware encargado del control del sistema, junto con la interfaz gráfica que facilita la visualización de datos.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento alineado con datos meteorológicos externos, lo que respalda la viabilidad técnica del alambique solar como una herramienta innovadora en el marco de la *economía circular* aplicada al sector oleícola.

3.1 Alambique solar, diseño mecánico

El alambique solar propuesto corresponde a una modificación de un secadero solar de tipo indirecto, el cual opera mediante el aprovechamiento del efecto invernadero. Este dispositivo incorpora un sistema diseñado específicamente para facilitar la condensación y extracción de la humedad presente en el orujo de aceituna. Para evaluar este diseño se fabricó un prototipo de dimensiones reducidas, que permite obtener una cantidad aceptable de agua, pero que al mismo tiempo es fácilmente transportable. Dado que el prototipo de energía solar aún no tiene partes móviles, su funcionamiento a pequeña escala se puede extrapolar perfectamente a un secadero grande. Este diseño permite el mantenimiento y evaluación del prototipo, sin necesidad de utilizar maquinaria específica para mover el conjunto. La Figura 3. 1 muestra la estructura del prototipo de alambique solar, con unas dimensiones de 590x690x700 mm (alto, ancho, profundidad). El prototipo está hecho de acero inoxidable 304, un acero

inoxidable austenítico al cromo-níquel que es no templable, ni magnético. Además, para reducir las pérdidas de calor al ambiente exterior y promover el efecto invernadero, las paredes internas del prototipo están aisladas térmicamente con poliestireno.



Figura 3. 1 Fotografía del prototipo de secadero solar.

El objetivo principal del sistema propuesto es reducir el contenido de humedad de las muestras de orujo de aceituna depositadas en su interior. Para ello, es necesario favorecer el aumento de la temperatura interna con respecto a la temperatura externa a través del efecto invernadero. El sistema debe colocarse en el exterior y debe soportar las duras condiciones ambientales de la provincia de Jaén (España) durante la campaña de recolección de la aceituna y posterior producción de aceite (de octubre a febrero), además de ser resistente a la corrosión, ya que el orujo de aceituna tiene un carácter ácido. Además, el sistema debe poder moverse cuando está cargado, por lo que debe ser lo suficientemente robusto como para soportar las fuerzas que pueda sufrir durante el transporte, sin desmontarse. Todos estos factores junto con otros, como el coste del prototipo, se tuvieron en cuenta en la elección de los materiales, priorizando el uso de elementos estándar como bisagras, que permiten la apertura de la tapa superior para cargar las muestras.

Con el fin de ilustrar la construcción del prototipo de alambique solar, en la Figura 3. 2 se presenta una vista 3D esquemática y su despiece. Para la construcción de la estructura se utilizó acero inoxidable 304 porque, además de aportar solidez a la estructura, es resistente a la corrosión. Pero como el acero es un conductor particularmente bueno de la temperatura, lo que podría ser un problema en los días de invierno, al favorecer la descarga de calor al ambiente, el sistema se aisló incorporando poliestireno en una disposición comúnmente conocida como "panel sándwich" (acero-poliestireno-acero), con un espesor de 50 mm.

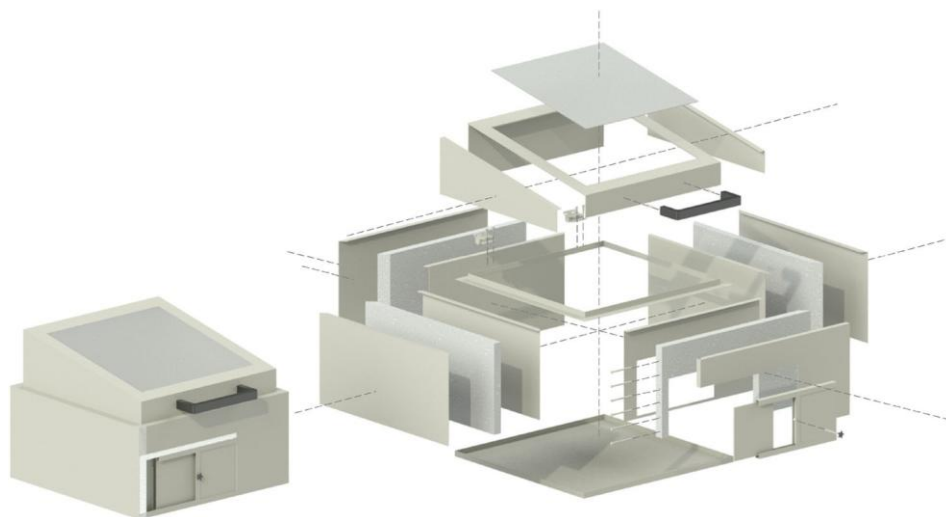


Figura 3. 2 Vista en 3D y explosionado del prototipo de secadero solar.

Además, el sistema cuenta con una puerta corredera en la parte delantera que permite la inspección de la muestra durante el proceso de secado, así como la eliminación de todo el material sobrante que atraviesa la plataforma perforada, de forma similar a un tamiz, sobre el que se coloca el material de la muestra. Este exceso de material es en su mayoría aceite residual, pero también pequeñas cantidades de orujo de aceituna que puede deslizarse a través de los agujeros. Sin embargo, representa una mejora con respecto a la colocación de una plataforma completamente sellada, ya que la estratificación del aceite dificulta el proceso de secado.

La cubierta del sistema cuenta con una ventana acristalada de 600x600 mm, que además de potenciar el efecto invernadero, funciona como un punto frío que, al entrar en contacto con el vapor liberado por el aumento de la temperatura interior, facilita la condensación. Esta ventana fue fabricada en vidrio con bajo contenido en hierro, ya que este material tiene bajos coeficientes de absorción y reflexión de la radiación, lo que favorece que las ondas solares de larga longitud permanezcan encerradas dentro del contenedor (efecto invernadero). Por lo tanto, el uso de vidrio con bajo contenido de hierro mejora la emisión dentro del sistema, pero sin que ello suponga un aumento de la temperatura de la superficie vidriada, debido a su bajo coeficiente de absorción. De este modo, se garantiza el gradiente de temperatura con el ambiente exterior, teniendo en cuenta las temperaturas ambientales relativamente bajas que rodean el sistema durante la temporada de producción de aceite de oliva.

Para favorecer la evacuación de la humedad condensada al exterior, se colocó la ventana acristalada con un ángulo de inclinación de 30° con respecto al suelo. Las gotas de agua se deslizan por el cristal inclinado por la acción de la gravedad hacia un canalón interior colocado al ras del cristal. Finalmente, el agua recolectada se almacena en un tanque externo, que se llena mediante una manguera que conecta el prototipo con el sistema de almacenamiento, que tiene

un ángulo de inclinación con respecto al suelo de aproximadamente 15° para facilitar la descarga de la humedad condensada. El prototipo final se colocó en la azotea de los laboratorios de la EPS Linares (coordenadas DMS: 3805'04"N 338'46"W), orientado hacia el sur.

3.2 Diseño de hardware

Con el fin de evaluar el rendimiento del sistema y poder monitorizar la evolución de las condiciones ambientales dentro y fuera del prototipo de alambique solar, se desarrolló un circuito de adquisición de datos personalizado. Así, el prototipo se instrumentó con sensores conectados a una placa electrónica diseñada con componentes que ocupan el menor espacio posible, y con conectividad inalámbrica para enviar los datos de forma remota, evitando tener que abrir el sistema una vez que el proceso de secado está en curso, lo que modificaría los resultados obtenidos debido a la pérdida de calor y humedad vaporizada.

En una primera instancia se realizó el diseño con una placa de prototipado con componentes THT (*through-hole technology*), con el objetivo de comprobar si el conjunto funcionaba de manera adecuada en las condiciones ambientales reales, para lo cual se dejó dentro del prototipo mecánico durante el verano. El conjunto que se puede observar en la Figura 3. 3 funcionó casi sin interrupciones durante los 3 meses que estuvo operativo, solo requiriendo algunas leves reparaciones en el conexionado inferior. Por lo que posteriormente se procedió al diseño e implementación del sistema en una placa de circuito impreso para evitar estos problemas (esta se puede observar en la Figura 3. 7).

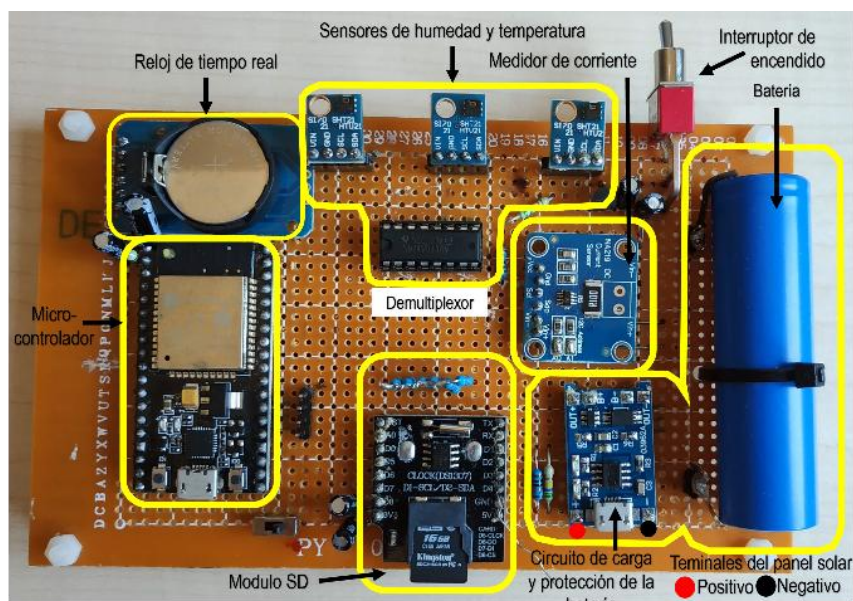


Figura 3. 3 Primera iteración del diseño de la placa de monitorización.

Los parámetros más relevantes que monitorizar son la temperatura y la humedad del aire, que se miden en las áreas superior e inferior dentro del secadero, junto con los valores ambientales, como se indica en la Figura 3. 4. La colocación de los sensores de humedad y temperatura en el interior del prototipo tiene como objetivo ayudar a entender cómo se produce el proceso de secado, así como verificar si la selección del material aislante fue correcta. Sin embargo, la placa electrónica inalámbrica es flexible y puede ampliarse añadiendo más sensores para mejorar la precisión, o más tipos de sensores para medir otras magnitudes físicas o parámetros de interés. Además, se colocó un medidor de irradiación solar estandarizado en las inmediaciones del prototipo, para evaluar el rendimiento del sistema considerando la cantidad de agua extraída y la radiación solar capturada.

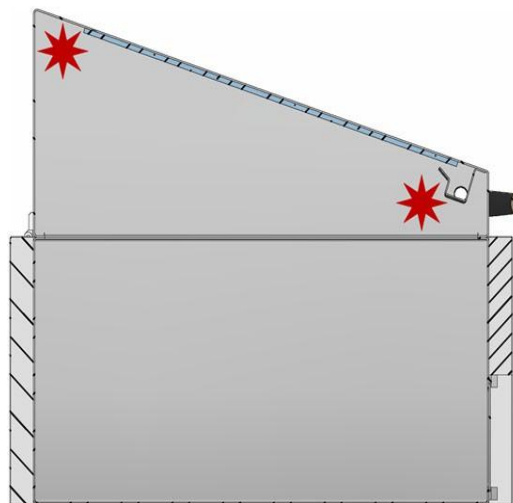


Figura 3. 4 Vista de la sección transversal del prototipo de alambique solar con la ubicación de los sensores indicado con estrellas rojas.

El sistema de adquisición de datos consta básicamente de una unidad de control que recopila todos los parámetros de medición, un reloj en tiempo real (RTC) y el sistema de suministro de energía. Los sensores utilizados en el diseño son dispositivos de bajo coste fácilmente disponibles, que proporcionan suficiente precisión para extraer los datos relevantes del experimento. Las muestras de datos incluyen marcas de tiempo para determinar el tiempo transcurrido correspondiente al experimento. Teniendo en cuenta la naturaleza inalámbrica de la recopilación de datos, es esencial asegurarse de que no haya pérdida de datos, como resultado de la comunicación inalámbrica entre el ordenador y la tarjeta de adquisición de datos.

El procesador de la unidad de control es un ESP32 de Espressif Systems. Este SoC (System on Chip) integra un microprocesador principal Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits y un coprocesador de ultra bajo consumo, interfaces periféricas para la comunicación con varios tipos de elementos externos y conectividad inalámbrica que incluye Bluetooth y un transceptor Wi-Fi que proporciona comunicación de datos remota.

El diseño se completa con los elementos que aparecen en la Figura 3. 5:

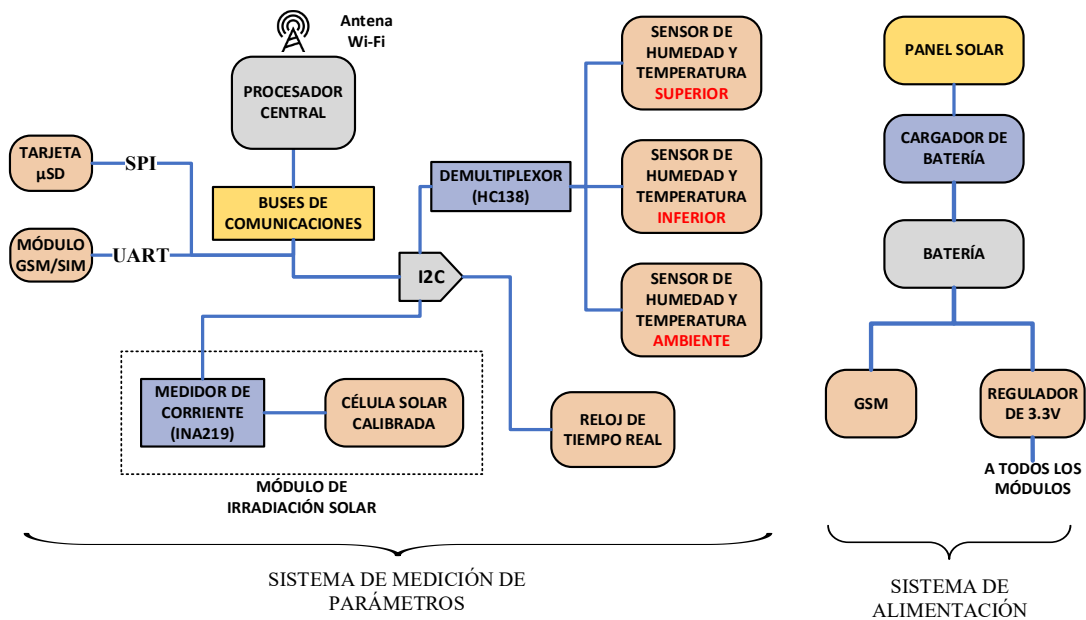


Figura 3. 5 Diagrama de bloques del circuito de adquisición de datos.

- Reloj en tiempo real:** basado en el DS3231, mantiene la sincronización temporal del procesador para proporcionar una marca de tiempo a cada bloque de medición tomado por el sistema.
- Tarjeta de memoria:** se utiliza para el almacenamiento local de datos tanto de medición como de mensajes de diagnóstico. Así, proporciona un sistema de respaldo en caso de pérdida de red, enviando datos una vez que se restablece la conexión. Esta memoria puede ser extraída y conectada a un ordenador para acceder a la información almacenada. La comunicación de datos se realiza a través de SPI.
- Módulo de irradiación solar:** el valor de la irradiación solar se obtiene midiendo la corriente de salida de una célula solar previamente calibrada (Atersa, Grupo Elecnor, España). La célula solar tiene una clasificación IP65 en el código de protección de ingreso (IEC 60529) y, por lo tanto, puede colocarse de forma segura en el exterior. Los resultados de medición se proporcionan utilizando el estándar de 4-20 mA, que corresponde a mediciones de 0 a 1200 W/m². La corriente eléctrica se mide por medio de un módulo basado en el sensor INA219, que realiza la conversión de analógico a digital, y envía el valor recogido al procesador central a través de la comunicación I²C.
- Sistema de alimentación:** consta de un panel solar, una batería de litio estándar tipo 18650 y un circuito de carga de baterías. Este módulo permite el funcionamiento alimentado por batería de todos los elementos del sistema, sin necesidad de conexión a la red eléctrica. Debido al bajo consumo de energía del sistema y al hecho de que el intervalo de muestreo es 10 minutos (139 muestras por día), el sistema puede estar en funcionamiento continuo durante 31 días sin fuente de alimentación. Sin

embargo, en condiciones de funcionamiento típicas, la batería siempre estará cargada durante las horas de luz diurna gracias al panel fotovoltaico de 6 W.

- e. **Medición de temperatura y humedad relativa:** la proporcionan dos dispositivos SHT20, que tienen una resolución de 0.04%HR y 0.01°C, para humedad relativa y temperatura, respectivamente. Estos sensores I²C tienen la misma dirección de acceso predefinida y no son programables. Así que, para comunicarse con varios dispositivos, se utilizó un demultiplexor digital HC138 de 3 a 8 líneas. Los sensores están conectados al sistema a través de cuatro cables, dos para la conexión de energía y dos para la transmisión de datos. Se utilizaron cables blindados para evitar el ruido eléctrico. Cada sensor se coloca en una carcasa de plástico impermeable para ofrecer protección mecánica y protección contra la condensación. Las cajas están provistas de aberturas de materiales porosos para permitir la medición de la temperatura y la humedad. Además, las conexiones entre la PCB y los cables de los sensores se cubrieron con una capa protectora de sellador acrílico para evitar la corrosión.
- f. **Módulo SIM:** este elemento se encarga de establecer la comunicación con la red móvil mediante un protocolo GSM/GPRS, que envía los datos al servidor de almacenamiento remoto para su posterior consulta. Este módulo proporciona más flexibilidad a la instalación, ya que no está limitado por la conectividad Wi-Fi.

3.3 Firmware

El sistema implementa una versión de FreeRTOS adaptada por el fabricante del microcontrolador. Este RTOS (sistema operativo en tiempo real) se encarga de gestionar los diferentes buses, tales como, UART, SPI, I²C, etc. así como las funciones necesarias para la transferencia de información a través del protocolo TCP/IP. Este método permite paralelizar las tareas, en función de las prioridades definidas por el programador. Esta alternativa de control de tareas ahorra recursos, dejando que el controlador asigne tareas, en función de las prioridades definidas anteriormente. Para ilustrar el funcionamiento del sistema, en la Figura 3. 6 se muestra un diagrama de flujo secuencial de las tareas principales. Sin embargo, los procesos se ejecutan en paralelo, excepto para el inicio y el cambio al modo de bajo consumo.

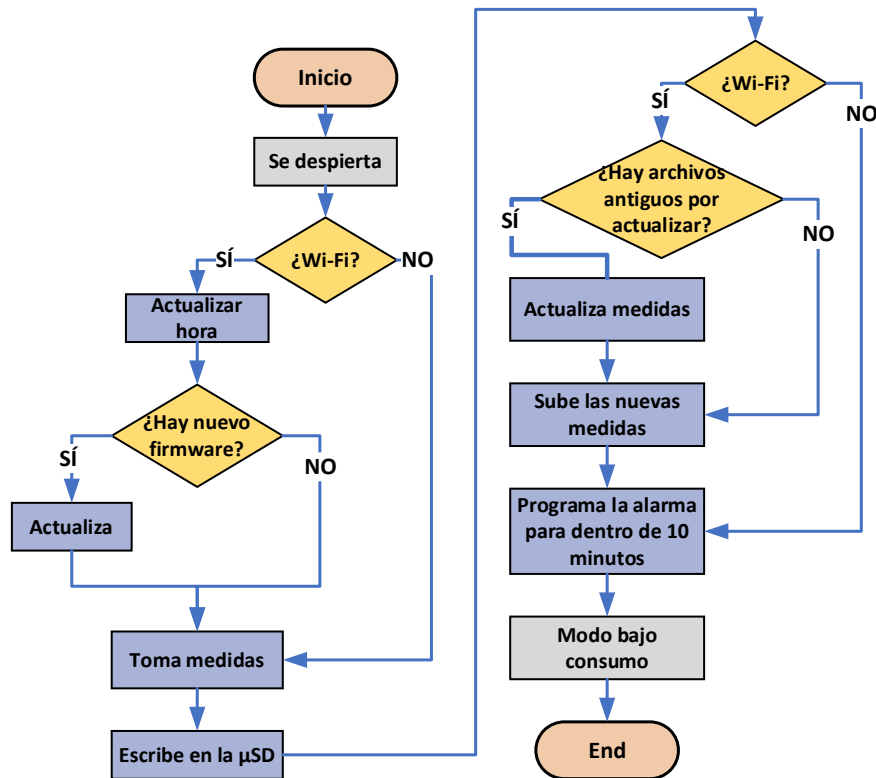


Figura 3. 6 Diagrama de flujo resumido del firmware.

El circuito de adquisición de datos tiene cuatro tareas principales: conexión Wi-Fi, actualización de firmware, captura de sensores y envío de datos. Cuando se inicia el sistema, todas las tareas se inician al mismo tiempo, pero la tarea de enviar datos al servidor y la tarea de actualizar el firmware esperan una conexión exitosa a la red Wi-Fi. Al mismo tiempo, la tarea de captura del sensor realiza un ciclo de captura y almacena las lecturas en la tarjeta SD. Si no se ha logrado una conexión a internet en un tiempo razonable, el sistema entra en modo de suspensión hasta que haya pasado el tiempo entre muestreos (10 minutos). Si se logra una conexión a internet dentro de un tiempo razonable, el sistema verifica la tarjeta SD en busca de datos sin actualizar (tanto datos internos del sistema como datos de medición) y, si los hay, se envía marcándolos como enviados.

Entre las comprobaciones que se realizan cuando se establece una conexión con la red Wi-Fi, se encuentra la realizada por la tarea de actualización de firmware. Se conecta al servidor local y verifica si es necesario actualizar el firmware. Si hay una actualización disponible, el sistema recibe los datos y los almacena en una partición *flash* alternativa, esperando a que se completen las tareas pendientes para reiniciar el sistema. Para realizar esta actualización OTA, la memoria del programa se divide en dos partes, alternándose entre ellas para cada cambio de versión. Por último, para asegurarse de que el sistema tiene la hora correctamente indexada, existe una tarea especial que actualiza la hora y la fecha de la PSTN a través de la conexión a internet, haciendo uso del protocolo NTP.

El sistema fue programado para enviar datos a dos servidores diferentes:

- Servidor local: envía los datos junto con la información de diagnóstico a un servidor local donde se almacenan y se pueden consultar localmente o de forma remota. Además, este servidor permite al usuario evaluar el funcionamiento del sistema, así como disponer localmente de datos de diagnóstico en caso de que surja algún problema.
- Ubidots: los datos se suben a la plataforma Ubidots en formato JSON, lo que permite su análisis en tiempo real en el portal IoT (Internet of Things).

3.4 Resultados

El prototipo de secadero solar estuvo funcionando a la intemperie durante varios meses en 2021 con el fin de comprobar que el montaje podía soportar el paso del tiempo, expuesto a las inclemencias del tiempo sin ninguna intervención de los usuarios, haciendo del circuito de adquisición de datos una monitorización continua de las diferencias de temperatura y humedad entre el interior y el exterior del conjunto. Estas condiciones de prueba se mantuvieron hasta el mes de octubre, que es cuando comienza el periodo de recolección de la aceituna.

La campaña de ensayos del prototipo se llevó a cabo durante el periodo del 9 al 18 de octubre de 2021, monitorizando la evolución de las características ambientales, así como la humedad contenida en una muestra de orujo de aceituna. Para ello, se utilizó una muestra de 11.28 kg de orujo de aceituna. El orujo de aceituna fue suministrado por la almazara SCA Santo Tomás (Santo Tomé, Jaén). Se midió la humedad contenida en la muestra para conocer el estado inicial del producto. Durante el proceso de secado, se tomaron muestras cada 2 días y se enviaron al laboratorio para determinar la evolución de su calor de combustión y contenido de humedad.

3.4.1 Cálculo del contenido de humedad

El orujo de aceituna se caracterizó mediante una serie de análisis químicos, que se realizaron por triplicado después del pesaje de las muestras para garantizar su reproducibilidad. La cantidad de agua extraída se puede determinar al final del proceso de secado simplemente observando la diferencia de masa. Se ha seguido un procedimiento analítico basado en la norma UNE-EN ISO 18134-1:2016 para realizar el proceso de secado, pero asegurándose de que la temperatura del secadero no supera los 85-90 °C, ya que a temperaturas más altas otros compuestos volátiles tienden a evaporarse, introduciendo errores en los resultados. Para que las muestras se sequen completamente, deben permanecer en el horno hasta que, después de dos mediciones consecutivas, tomadas a intervalos de 12 horas, sus pesos permanezcan prácticamente inalterados (diferencia de peso inferior al 1%). Los resultados de laboratorio del pesaje se muestran en la Tabla 3. 1, con un contenido de humedad promedio de las muestras igual a 67.17%. Cabe destacar que la cantidad de humedad presente en

la muestra puede expresarse en base húmeda (W) o en base seca (X), como se indica a continuación [55], [102]:

Tabla 3. 1 Datos iniciales de las muestras de alperujo: Contenido en humedad.

Nº Muestra	Peso de alperujo (g)		W (wt. %),	X,
	Antes del secado	Después del secado	$\frac{kg_{humedad}}{kg_{muestra\ húmeda}} \times 100$	$\frac{kg_{humedad}}{kg_{muestra\ seca}} \times 100$
Muestra uno	20.978	6.768	67.74	2.10
Muestra dos	30.551	10.029	67.17	2.05
Muestra tres	38.190	12.751	66.61	2.00

$$W = \frac{m_i - m_f}{m_i}, \text{ base húmeda (wb)} \quad (3.1)$$

$$X = \frac{m_i - m_f}{m_f}, \text{ base seca (db)} \quad (3.2)$$

Donde los parámetros son:

- **W** Contenido de humedad en la muestra, en base húmeda (kg humedad/kg de la muestra húmeda).
- **X** Contenido de humedad en la muestra, en base seca (kg humedad/kg de la muestra seca).
- **m_i** Masa inicial de la muestra húmeda cargada dentro del prototipo del alambique solar (kg).
- **m_f** Masa final de la muestra húmeda cargada dentro del prototipo del alambique solar (kg).

3.4.2 Cálculo del calor de combustión

Una aplicación muy común del orujo de aceituna es como combustible renovable en plantas de bioenergía. En este sentido, normalmente se requiere una reducción en el contenido de humedad de este subproducto para liberar una mayor cantidad de calor cuando se quema. Por lo tanto, se realizó un estudio sobre la reducción de su contenido de humedad y el aumento de su poder calorífico durante el proceso de secado dentro del prototipo de alambique solar.

Para ello, el prototipo se cargó con una cantidad determinada de materia prima de biomasa húmeda y se extrajeron muestras cada 2 días.

La composición elemental del orujo de aceituna se determinó mediante un análisis elemental, que proporciona la información relativa a las fracciones de masa de elementos como carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Se utilizó un analizador elemental CHNS (Thermo Finnigan Flash EA1112, Waltham, MA, USA) para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en las muestras, mientras que el contenido de oxígeno se calculó por diferencia. Los resultados de estas mediciones, expresados en porcentajes de peso en seco, se presentan en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2 Análisis elemental de la muestra de alperujo (wt. % base seca).

Muestra n ^o	C	H	N	S	O ^a
Muestra uno	44.0050	6.4260	1.2036	0.1251	48.2404
Muestra dos	43.9213	6.4352	1.2559	0.0784	48.3092
Promedio	43.9631	6.4306	1.2298	0.1017	48.2748

^a El contenido de oxígeno fue determinado por diferencia.

Para la determinación experimental del calor de combustión del orujo de aceituna se utilizó un calorímetro automático de isoperibólico (serie 6400, Moline, IL, EE. UU.). Este equipo permite calcular el *poder calorífico superior* (PCS) quemando una cantidad conocida de muestra de combustible y midiendo la cantidad de calor producido en el proceso, que se calcula a partir del aumento de la energía térmica de un líquido de propiedades conocidas (como el agua). Para la determinación experimental del PCS, la medición debe realizarse con una muestra seca. A continuación, el PCS se expresa a la temperatura estándar de 25°C.

Para la mayoría de las aplicaciones de combustibles sólidos, se utiliza el *poder calorífico inferior*, ya que el calor contenido en los productos de combustión generalmente no se devuelve a la temperatura previa a la combustión. El PCI se estimó a partir del PCS determinado experimentalmente, el análisis elemental y el contenido de humedad a través de la ecuación 3.3.

$$PCI = PCS - \Delta h_{vap} \left(\frac{9H_2}{100} + \frac{W}{100} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

- **PCS** = Poder calorífico inferior.
- **PCI** = Valor calorífico superior.

- H_2 = Contenido en hidrógeno de la muestra (wt. %).
- W = Contenido de humedad de la muestra (wt. %, base húmeda).
- Δh_{vap} = Entalpía de vaporización del agua a 25 °C, que se corresponde con 2.4417 MJ·kg⁻¹.

Un parámetro importante que tener en cuenta a la hora de calcular el PCI del combustible es el contenido de humedad de la muestra. Dependiendo del contenido de humedad de la muestra, su composición elemental cambiará. Por lo tanto, los valores indicados en la Tabla 3. 2 para la muestra seca deben corregirse para considerar el contenido de humedad de la muestra húmeda cuya composición elemental se va a determinar. El poder calorífico más bajo a presión constante se corrigió por el contenido de humedad (PCI tal como se recibió, en base húmeda) utilizando la ecuación 3.4.

$$PCI_{wb}(MJ/kg) = PCI_{db}(MJ/kg) \times \frac{100 - W}{100} - \Delta h_{vap} \times \frac{W}{100} \quad (3.4)$$

El PCS de una muestra de orujo de aceituna seco se midió por triplicado con el calorímetro automático de isoperibólico, dando como resultado un valor medio de 4616.61 kcal/kg (19.32 MJ/kg). Posteriormente, se calculó el PCI del orujo de aceituna en base húmeda según las ecuaciones 3.3 y 3.4.

En la Tabla 3. 3 se muestra un resumen de los valores obtenidos del análisis elemental de las muestras, junto con el contenido de humedad y el PCI, los cuales se midieron a intervalos de 2 días. Como resultado de los análisis anteriores, el orujo de aceituna húmedo depositado inicialmente en el interior del prototipo de alambique solar contenía un 67.17% de humedad (base húmeda), con un PCI de 1053.44 kcal/kg (4.41 MJ/kg). Después de un período de 10 días, el contenido de humedad de la muestra de orujo de aceituna húmeda disminuyó a 39.90% (base húmeda), lo que corresponde a un PCI de 2374.01 kcal/kg (9.93 MJ/kg).

Tabla 3. 3 Resultados del análisis elemental junto con el PCI y los valores de humedad de la muestra durante el experimento.

	Análisis elemental (wt.%, base húmeda)					W (wt.%)	PCI (kcal/kg)	PCI (MJ/kg)
	C	H	N	O	S			
Muestra inicial	14.507	2.1221	0.4058	15.9307	0.0336	67.17	1053.44	4.41
Muestra día 2	17.3494	2.5377	0.4853	19.0510	0.0402	60.53	1374.99	5.75
Muestra día 4	20.5812	3.0105	0.5757	22.5997	0.0476	53.19	1730.43	7.24
Muestra día 6	24.666	3.6080	0.6900	27.0854	0.0571	43.89	2180.79	9.12
Muestra día 8	25.7989	3.7737	0.7217	28.3291	0.0597	41.31	2305.73	9.65
Muestra día 10	26.4214	3.8647	0.7391	29.0127	0.0612	39.90	2374.01	9.93

3.4.3 Funcionamiento del circuito de adquisición de datos: Hardware y software

El sistema de monitorización se implementó por medio de una placa electrónica ensamblada y diseñada específicamente para este trabajo. Tiene los elementos discutidos en la sección *Diseño de hardware*. Dado que el secado es un proceso a largo plazo, una evaluación adecuada del sistema requiere que los datos se midan y almacenen durante todo el proceso de secado, para evaluar el rendimiento del sistema y para modelar las variables que afectan al proceso. El sistema funciona de forma cíclica, siendo las principales operaciones: la adquisición de datos, el almacenamiento y la comunicación remota. Gracias a que el sistema se despierta periódicamente para tomar medidas durante unos segundos y luego vuelve a un estado de bajo consumo de energía, se utiliza un promedio reducido de energía. Durante los días de buen tiempo, la batería se puede cargar completamente en tan solo media hora, desde la mitad de la carga hasta la carga completa. La capacidad de cargar la batería en un período reducido también se debe al sobredimensionamiento del panel solar, lo que garantiza la carga de la batería incluso durante los días nublados. La Figura 3. 7 muestra la implementación de hardware del circuito de adquisición de datos.

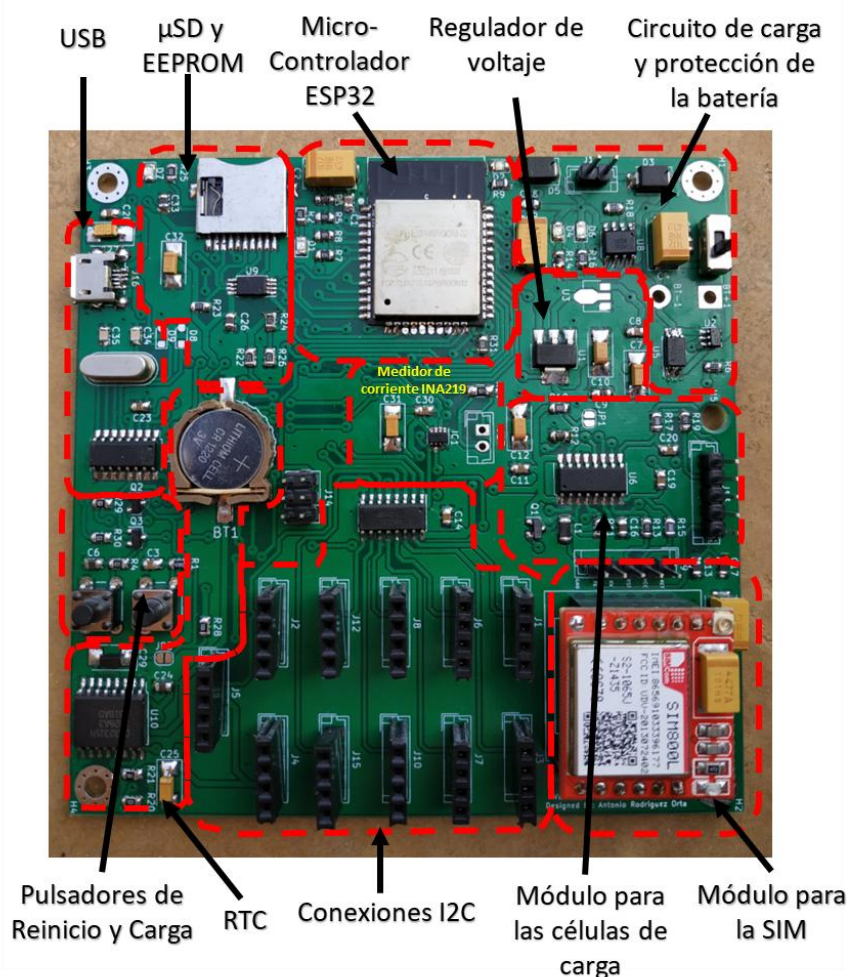


Figura 3. 7 Hardware del circuito de adquisición de datos.

El software fue diseñado para ser a prueba de fallos, utilizando el sistema operativo FreeRTOS que permite al usuario definir una serie de tareas con prioridad. Esta prioridad es establecida por el programador, asegurándose de que todas las tareas se realicen dentro de un tiempo determinado. Con esta implementación del software, el sistema está protegido contra eventualidades como un fallo de la red Wi-Fi. Así, si el sistema reconoce que la red Wi-Fi no es accesible, toma las medidas necesarias y pasa al modo de suspensión, esperando hasta que se realice la siguiente medición. Si cuando el sistema se despierta para realizar la siguiente medición, la red vuelve a ser accesible, envía todos los datos no cargados previamente al servidor. De lo contrario, espera hasta que la red vuelva a estar disponible, repitiendo el ciclo de activación, toma de medidas y almacenamiento, para luego poner el sistema en modo de suspensión. Además, si el servidor local está fuera de línea o la transmisión de datos al servidor de Ubidots causa una falla, el sistema cerrará la conexión y entrará en modo de suspensión; a continuación, volverá a intentar el proceso durante el siguiente ciclo de conexión. La Figura 3. 8 ilustra los gráficos que el usuario puede visualizar durante la etapa de operación del sistema, implementados en Ubidots y accesibles de forma remota.



Figura 3. 8 Interfaz de control con representación gráfica de las variables monitorizadas.

La frecuencia de las mediciones es un parámetro programable a distancia, así como la frecuencia con la que se han de enviar al servidor remoto. Los valores medidos de temperatura, humedad y radiación solar se complementan con los valores de voltaje de la batería y voltaje del panel solar, así como una marca de tiempo asociada que permite una clasificación de datos basada en fechas. Los datos, que se suben a la plataforma Ubidots, pueden ser vistos directamente, o descargados para su posterior análisis, como se muestra en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11, durante el período de estudio antes mencionado (del 9 al 18 de octubre de 2021).

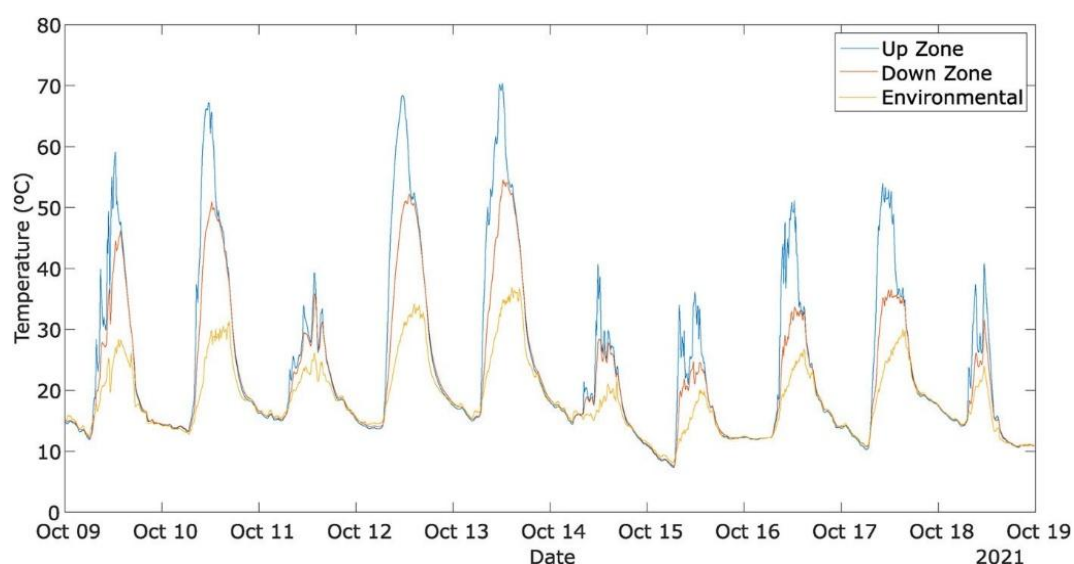


Figura 3. 9 Monitorización de la temperatura durante el periodo de estudio.

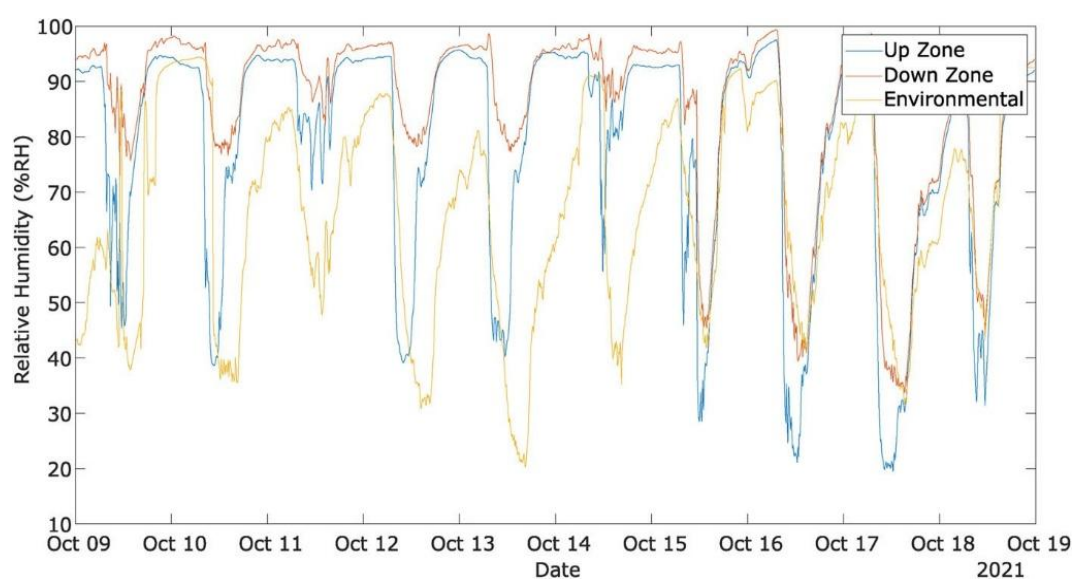


Figura 3. 10 Monitorización de la humedad durante el periodo de estudio.

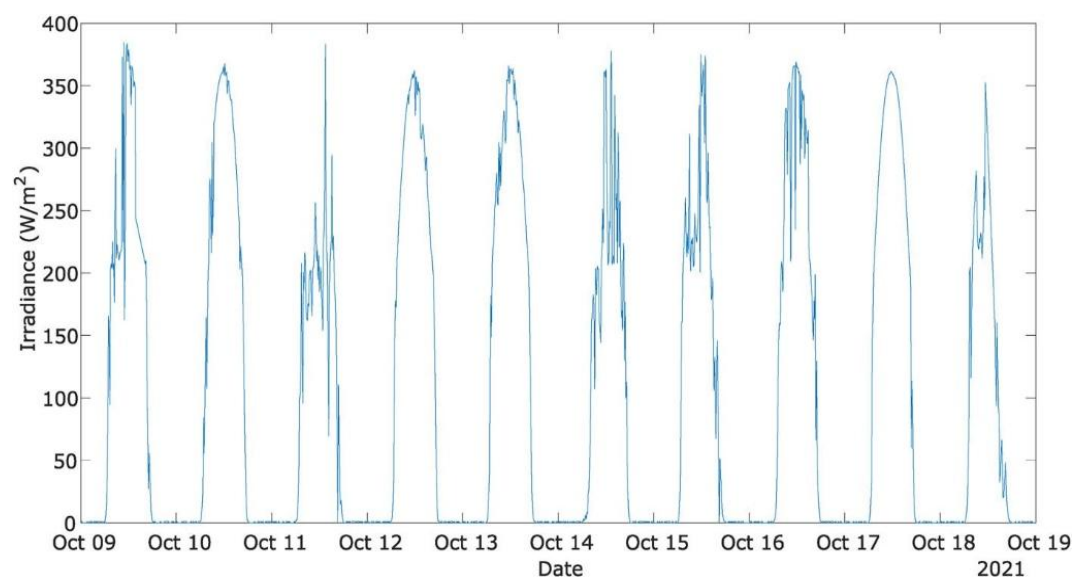


Figura 3. 11 Monitorización de la irradiancia durante el periodo de estudio.

Con el fin de verificar que estas mediciones se corresponden con la realidad, se compararon con los datos proporcionados por diferentes agencias meteorológicas, tales como la *Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio* (NASA). Se utilizó la herramienta de visualización de acceso a datos *POWER* dentro de la comunidad de usuarios de energías renovables [103], para recuperar datos de la estación más cercana, ubicada en Andújar (Jaén, España), que está a unos 40 km al oeste de Linares. Tras una búsqueda exhaustiva, no fue posible acceder a información actualizada de una estación meteorológica registrada perteneciente a una institución reconocida y con mediciones meteorológicas accesibles para la ciudad de Linares. A pesar de ello, los datos obtenidos fueron considerados como una media estadística de los últimos años proporcionados por la *Agencia Andaluza de la Energía* (AAE) [37].

De acuerdo con lo anterior, cabe destacar que los datos de temperatura y humedad relativa no son exactamente iguales, sino que deben seguir un patrón similar y estar dentro del mismo orden de magnitud. Sin embargo, lo que sí tiene que ser notablemente similar es la irradiación, ya que presenta poca variación dentro de la misma provincia y zona geográfica. Sin embargo, esto todavía permite que ocurran algunos picos en las mediciones, como se puede observar en la Figura 3. 12, que se atribuyen principalmente a los efectos de sombreado de las nubes durante el período de muestreo (Figura 3. 13 y Figura 3. 14).

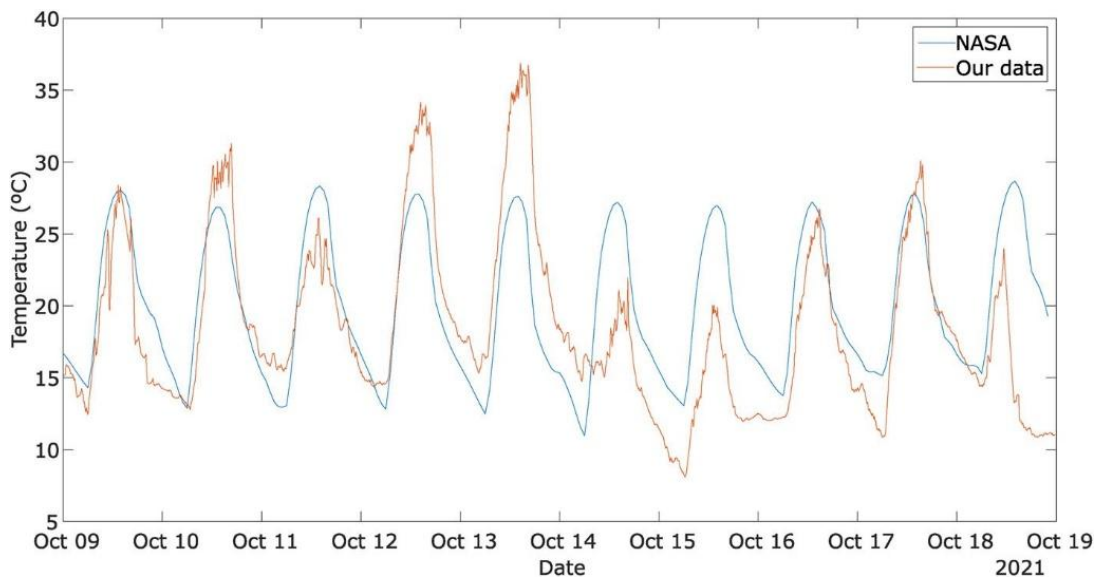


Figura 3. 12 Comparación de los registros de temperatura del prototipo y los valores estimados por *Renewable Energy* (NASA) [103].

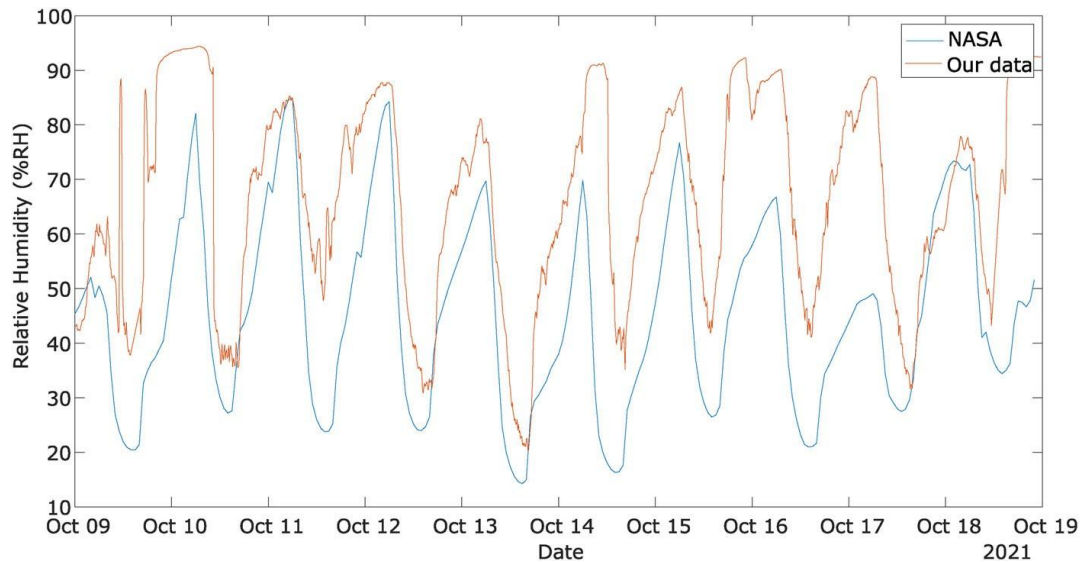


Figura 3.13 Comparación de los registros de humedad del prototipo y los valores estimados por *Renewable Energy* (NASA) [103].

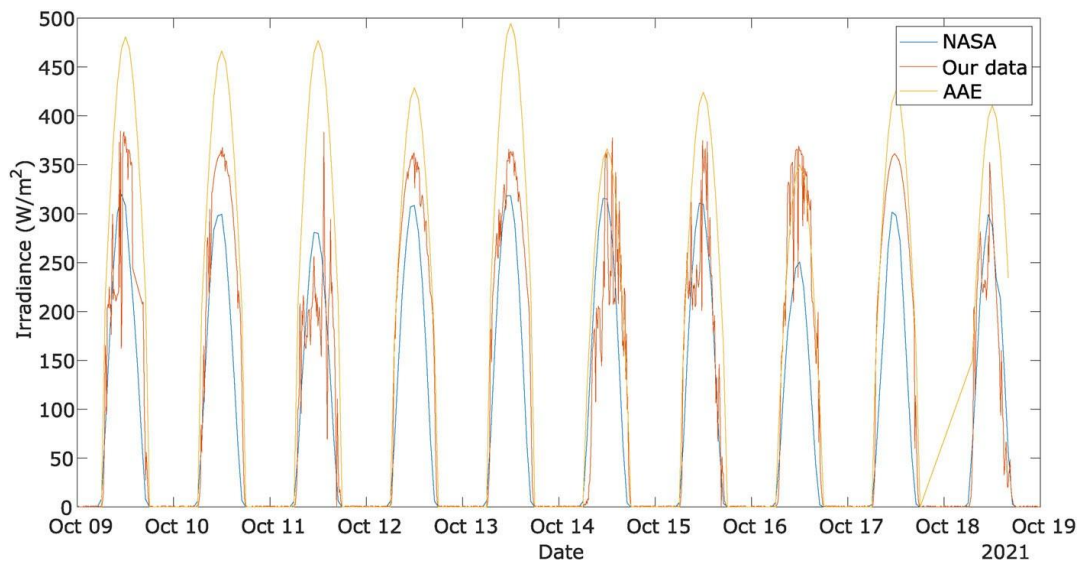


Figura 3.14 Comparación de los registros de irradiancia del prototipo y los valores estimados por *Renewable Energy* (NASA) [37], [103].

3.4.4 Evolución del contenido de humedad y del PCI

En este apartado se presentan los resultados del seguimiento obtenidos durante el periodo de 10 días del proceso de secado del orujo de aceituna. La Figura 3.15 ilustra gráficamente la evolución de la humedad y el PCI de la muestra dentro del prototipo de alambique solar, que se probó en una campaña experimental que abarcó los días 9 al 18 de octubre de 2021, con mediciones realizadas cada 2 días. El contenido de humedad del orujo de aceituna en el prototipo de alambique solar disminuyó del 67.17% al 39.90%, mientras que su PCI aumentó sustancialmente de 1053.44 kcal/kg (≈ 4.41 MJ/kg) a 2374.01 kcal/kg (≈ 9.93 MJ/kg) como resultado del proceso de secado.

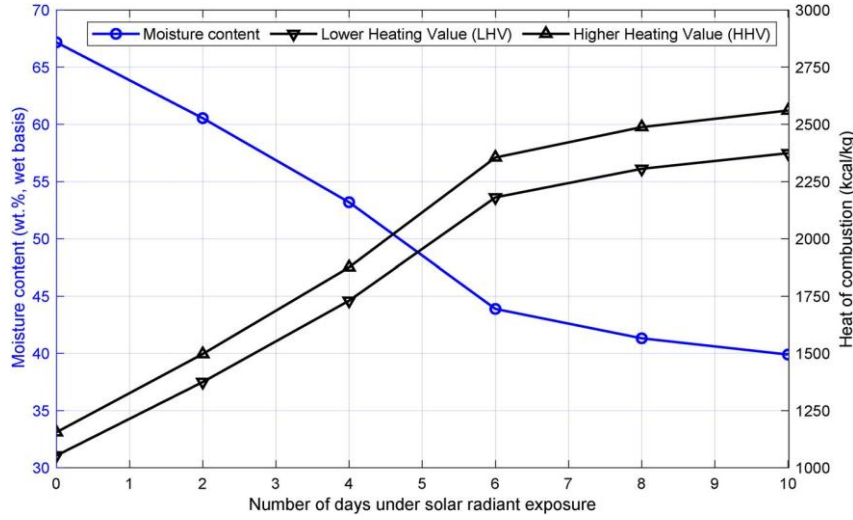


Figura 3.15 Evolución del contenido de humedad y el poder calorífico inferior con respecto al número de días bajo exposición a la radiación solar.

3.4.5 Rendimiento de secado

Otro factor clave para evaluar el correcto funcionamiento del prototipo de alambique solar es el cálculo de la *eficiencia térmica de secado* (η_{th}) utilizando la (3.5) de manera similar al procedimiento reportado por Baniasadi et al. [55]. En los procesos de secado, la *eficiencia térmica de secado* generalmente se define como la relación entre la energía utilizada para la evaporación de la humedad y la entrada total de energía térmica para el secado [34], [104]. Para el caso particular del prototipo de alambique solar, este parámetro se calcula como la energía requerida para eliminar una cierta cantidad de humedad de la muestra dividida por la energía radiante solar real que llega a la ventana acristalada [102]. La eficiencia térmica del secado también se conoce en la literatura científica como *eficiencia del sistema* o *eficiencia del secado* [102]. Para el cálculo de la *eficiencia térmica de secado*, es fundamental determinar la radiación solar total que incidió sobre la superficie del vidrio durante el período de estudio, con base en los datos obtenidos durante la monitorización mostrada en la Figura 3.11.

$$\eta_{th} = \frac{m_i W_i - m_f W_f}{R S_{glass}} = \frac{m_{dry} * (X_i - X_f) \Delta h_{vap}}{R_{glass}} \quad (3.5)$$

Donde m_{dry} es la masa de la muestra seca (kg), R es la exposición a la radiación solar ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) y S_{glass} es la superficie del vidrio sobre la que incide la radiación solar (0.364 m^2). La exposición a la radiación solar (R) es la irradiancia solar de una superficie (E) integrada a lo largo del tiempo de irradiación (t), como se muestra en la ecuación 3.6.

$$R = \int_{t_i}^{t_f} E(t) dt \quad (3.6)$$

La Tabla 3.4 muestra la evolución del contenido de humedad de la muestra, junto con la irradiación solar recibida por el prototipo, durante un período de 10

días desde el 9 de octubre hasta el 18 de octubre de 2021. Las mediciones del contenido de humedad se realizaron cada 2 días y los valores de irradiación mostrados son la suma de dos días consecutivos. Como resultado, la eficiencia de secado se calculó utilizando la ecuación (3.5 y se expresó en porcentaje. Cabe destacar que las mediciones tomadas con el sistema de monitorización inalámbrica se realizaron cada 10 minutos, por lo que se realizaron los cálculos necesarios para convertir de W/m² cada diez minutos a MJ/m², utilizando integración trapezoidal dentro de los intervalos de horas y luego días.

La tasa de secado promediada en el tiempo (r) se calcula de acuerdo con la ecuación 3.7 ya que la humedad se evapora después de cada dos días consecutivos.

$$r = \frac{m_i W_i - m_f W_f}{t_f - t_i} = \frac{m_{dry}(X_i - X_f)}{t_f - t_i} \quad (3.7)$$

Otro indicador sobre el rendimiento del prototipo es el consumo específico de energía (SEC), que se define como la cantidad de energía requerida por el prototipo de alambique solar para evaporar una unidad de masa de contenido de humedad de la muestra [33], [102].

$$SEC = \frac{R S_{glass}}{m_i W_i - m_f W_f} = \frac{R S_{glass}}{m_{dry}(X_i - X_f)} \quad (3.8)$$

El valor recíproco del consumo de energía específica es la tasa de extracción de humedad específica (SMER), que indica la cantidad de humedad evaporada por unidad de energía suministrada al prototipo de alambique solar [33], [102].

$$SMER = SEC^{-1} = \frac{m_i W_i - m_f W_f}{H S_{glass}} = \frac{m_{dry}(X_i - X_f)}{H S_{glass}} \quad (3.9)$$

Tabla 3.4 Principales parámetros de rendimiento del prototipo de alambique solar durante el periodo de ensayo.

Día nº	W (wt. %), $\frac{kg \text{ humedad}}{kg \text{ base húmeda}} \times 100$	X, $\frac{kg \text{ humedad}}{kg \text{ base seca}} \times 100$	r, $\frac{kg \text{ humedad}}{\text{día}} \times 100$	R, MJ/m ²	SEC, $\frac{MJ}{kg \text{ humedad}}$	SMER, $\frac{g \text{ humedad}}{MJ}$	η_{th} (%)
0	67.17	2.05	-	-	-	-	-
2	60.53	1.53	0.37	31.75	15.45	64.81	14.54
4	53.19	1.14	0.41	39.30	17.28	57.88	12.99
6	43.89	0.78	0.52	38.88	13.49	74.13	16.64
8	41.31	0.70	0.15	31.50	39.41	25.37	5.69
10	39.90	0.66	0.08	28.65	65.57	15.25	3.42

La eficiencia media de secado después de 10 días de exposición a la radiación solar fue de alrededor del 10.66%. Por los datos mostrados en la Tabla 3. 4 se puede visualizar el momento en que el sistema alcanza un pico de eficiencia de secado. La eficiencia máxima diaria fue del 16.64% al sexto día, con potencial de adquirir valores ligeramente superiores en diseños optimizados y condiciones climáticas favorables. A partir de entonces, la eficiencia de secado comenzó a disminuir drásticamente, lo que se atribuye principalmente a una menor tasa de secado cuando se acerca a las condiciones de equilibrio (como lo demuestra la tasa reducida de eliminación de humedad después del sexto día de exposición a radiación) y también debido a la acumulación de aceite en la capa superior como resultado de su menor densidad, lo que dificulta la vaporización de la humedad. Con el fin de evitar los efectos negativos de la acumulación de aceite en el rendimiento del sistema, una propuesta para mejorar el prototipo sería incluir un mecanismo de agitación, como un pequeño motor conectado a una hélice, que homogeneice la mezcla. Además, a medida que la muestra se seca, la capacidad de eliminación de humedad disminuye, ya que se acerca al punto de máxima extracción de humedad.

El rendimiento del prototipo de alambique solar se validó satisfactoriamente para la aplicación objetivo, que es el desarrollo de un sistema de secado pasivo con un consumo de energía y costes de mantenimiento muy bajos, además de la posibilidad de recuperar agua para el riego de los campos. A diferencia de los secaderos de tambor rotativo tradicionales, que funcionan de forma continua, el prototipo de alambique solar desarrollado en este trabajo funciona a través de un proceso discontinuo, es decir, en lotes. Por lo tanto, aunque ambos procesos no son estrictamente comparables, hay que tener en cuenta que los secaderos solares son claramente superados en términos de tiempo de secado y eficiencia térmica de secado por los secaderos de tambor rotativo, que representan una de las opciones más extendidas para el manejo del orujo de aceituna. Los secaderos industriales modernos de tambor rotativo que funcionan con orujo de aceituna tienen un tiempo de residencia relativamente corto, del orden de varias decenas de minutos [32], [34], mientras que los secaderos solares requieren períodos de secado comparativamente más largos, generalmente más de un día y hasta una o dos semanas. La eficiencia térmica de secado (η_{th}) de los secaderos de tambor rotativo suele estar entre el 35 y el 70% [40], mientras que los secaderos solares exhiben eficiencias térmicas comparativamente más bajas, normalmente por debajo del 30% [40]. A modo de ilustración, recientemente se predijo una eficiencia térmica de secado del 58.8% para el proceso de secado de orujo de aceituna desde un contenido de humedad inicial del 65% hasta un 12.5% (base húmeda) en un secadero de tambor rotativo de flujo paralelo [34]. El requerimiento térmico de dicho secadero se estimó en aproximadamente 3.80 MJ/kg de agua evaporada, lo que está marcadamente por debajo del consumo específico de energía del prototipo de alambique solar desarrollado en el presente trabajo. Como otro ejemplo, un estudio experimental

sobre el rendimiento de un secadero industrial de tambor rotativo con una capacidad de procesamiento de 12.500 kg/h de orujo de aceituna húmedo desde un contenido de humedad inicial del 45.2% hasta un contenido de humedad final del 15% (base húmeda) reveló una eficiencia térmica de secado del 54% y un consumo de energía específico de 4.74 MJ/kg [32], claramente por debajo de las cifras reportadas en la Tabla 3. 4 para el prototipo de alambique solar. Sin embargo, a pesar de su mejor rendimiento en términos de tiempo de secado y eficiencia térmica de secado, los secaderos de tambor rotativo requieren un consumo de combustible [32], [34], [35], [36], generalmente gas natural u orujo de aceituna agotado, lo que representa una gran carga económica y ambiental. Por el contrario, los secaderos solares se caracterizan por el uso de una fuente de energía gratuita, no contaminante, renovable y abundante que no puede ser monopolizada [40]. Además, como ventaja adicional, el prototipo de alambique solar desarrollado en este trabajo permite la extracción de agua para el riego del campo y carece de partes móviles, lo que reduce el mantenimiento.

3.5 Discusión y conclusiones

3.5.1 Prototipo físico

En este trabajo se diseñó y desarrolló un prototipo de alambique solar como complemento al proceso convencional de secado del orujo de aceituna, actualmente dominado por los combustibles fósiles. Un desafío importante que presenta este sistema es que está diseñado para funcionar en lotes, no de forma continua como con los secaderos de tambor rotativo. Presenta una eficiencia relativamente baja, cuando funciona de forma pasiva, que podría mejorarse con la ayuda de un sistema de secado auxiliar (a través de resistencias alimentadas por paneles fotovoltaicos), pero tendría un impacto negativo debido al aumento de la inversión inicial. Por último, también hay que tener en cuenta el aumento del coste de las materias primas, y en particular el de materiales como el acero inoxidable. A pesar de lo anterior, este sistema puede representar una mejora conveniente para los productores de aceite de oliva, quienes asumen los gastos de transporte del orujo húmedo a las plantas de extracción de aceite de orujo de oliva, al reducir el peso a transportar. Además, el prototipo de alambique solar puede funcionar solo con energía solar y con muy poco mantenimiento y, a diferencia de otras alternativas de gestión, el sistema desarrollado permite obtener agua como subproducto, cuya reutilización es de gran importancia, especialmente en climas secos.

El prototipo de alambique solar fue capaz de reducir el contenido de humedad de la muestra de 11.28 kg de orujo de aceituna del 67.17% al 39.90% sin necesidad de aporte de ninguna fuente de energía convencional, solo a través de la acción solar, en un periodo de 10 días. Además, se obtuvieron 2.4 litros de agua como subproducto del proceso, lo que representa el 21.28% en peso de la muestra. La cantidad de humedad evaporada durante el periodo de 10 días fue de 3.08

litros, por lo que la eficiencia de recuperación de humedad para riego fue de aproximadamente 78%. A pesar de que el prototipo de alambique solar tiene una eficiencia relativamente baja, debe destacarse que no se requiere consumo de combustible. Una de las principales desventajas del prototipo de alambique solar desarrollado es que el secado del orujo de aceituna mediante el sistema propuesto aquí sólo puede utilizarse eficazmente en términos de recuperación de humedad para aplicaciones de riego durante los meses fríos de otoño e invierno. Esto se debe a que el contacto con la superficie fría del vidrio favorece la condensación de la humedad evaporada. Sin embargo, los meses fríos coinciden con la producción estacional de orujo de aceituna, lo que resulta ideal para la aplicación propuesta.

Durante el proceso de prueba, se observó que el aceite de oliva se acumulaba en la superficie superior, creando una fina capa superficial debido a la estratificación del aceite y el agua contenidos en el orujo de aceituna. Este aceite de orujo de oliva restante, que puede ser perjudicial para la etapa de secado, tiene un valor económico y, por lo tanto, generalmente se recupera en las plantas de extracción de orujo de aceituna. En consecuencia, cualquier proceso de separación que permita recuperar el aceite de orujo es beneficioso. Con el fin de facilitar la extracción de parte de este aceite, la muestra se colocó sobre una plataforma cuya superficie de contacto es un tamiz. Este patrón permite que el aceite penetre separándose del orujo de aceituna. Con este sencillo paso, se consiguió separar gran parte de la humedad restante de la muestra de orujo de aceituna gracias a la acción del tiempo y al efecto invernadero que se produce en su interior. La acumulación del aceite de orujo de oliva en la capa superior de la muestra es perjudicial para el proceso de secado del orujo. Una mejora que se podría plantear para facilitar la eliminación de humedad sería la incorporación de un mecanismo de agitación accionado por un motor eléctrico, que se encargaría de homogeneizar la muestra, dificultando así la acumulación de aceite de oliva durante las primeras etapas del proceso de secado y aumentando el rendimiento de secado. Alternativamente, otro enfoque para mejorar el rendimiento de secado es introducir mejoras constructivas, como el calentamiento de la superficie inferior mediante elementos calefactores alimentados por energía solar fotovoltaica o energía solar térmica. Esto permitiría aumentar la velocidad de secado sin necesidad de piezas móviles. Una mejora adicional del prototipo para recuperar agua destilada sería aplicar una pequeña capa de recubrimiento hidrofóbico, que facilitaría el deslizamiento del agua sobre la superficie del vidrio. Este enfoque sería interesante teniendo en cuenta las pérdidas de humedad evaporada que se producen al abrir el dispositivo para realizar las operaciones de carga y limpieza.

3.5.2 Prototipo electrónico

El sistema de sensores desarrollado recoge y analiza los datos de forma remota, permitiendo visualizar la evolución del sistema y reaccionar ante cualquier complicación de una forma más sencilla, sin tener que interactuar físicamente con el sistema. Para facilitar el análisis de los datos en tiempo real, se incluyó una interfaz gráfica. Además, al tratarse de un sistema autónomo alimentado por batería, que a su vez es cargada por un panel fotovoltaico, se eliminan posibles problemas con el suministro de energía. Esto permite una mayor facilidad para su traslado y mantenimiento al no tener que considerar los peligros de trabajar con alta tensión. Los componentes de hardware fueron elegidos para garantizar funcionalidad, bajo coste y bajo consumo de energía con un tamaño optimizado, brindando flexibilidad al sistema al incorporar conectores que permiten agregar diferentes sensores o actuadores que utilizan el protocolo I²C.

Capítulo 4

Optimización del proceso de deshidratación del orujo de aceituna mediante la integración de la dinámica de fluidos computacional y el aprendizaje profundo

En este capítulo se presenta un estudio realizado a un prototipo de secadero solar utilizado para reducir la humedad de muestras de biomasa, en particular las de orujo de aceituna, y cómo la influencia de la velocidad del aire dentro de la cámara de secado influye en la distribución de temperatura. Para evaluar las diferentes alternativas se propuso un modelo de simulación de dinámica de fluidos computacional alimentada con datos reales obtenidos con una placa que incorpora sensores de temperatura, humedad e irradiación solar. Para fomentar la incorporación de estas técnicas de estudio en la revalorización de los desechos de otros sectores, se comenta cuál ha sido el programa utilizado para realizar las simulaciones nombrando los modelos utilizados.

4.1 Estudio de dinámica de fluidos computacional

La simulación CFD es muy utilizada en la industria debido a sus múltiples ventajas, entre las que se encuentran sus bajos costes en comparación con los de las técnicas experimentales y la posibilidad de simular fenómenos físicos complicados. La simulación CFD debe validarse experimentalmente para confirmar que la configuración de los modelos y parámetros son apropiados para el estudio de caso [105]. La CFD ha sido ampliamente utilizada en el estudio de procesos en los que hay transferencia de masa y calor en el aire [106], [107]. La metodología utilizada se puede observar en la Figura 4. 1.

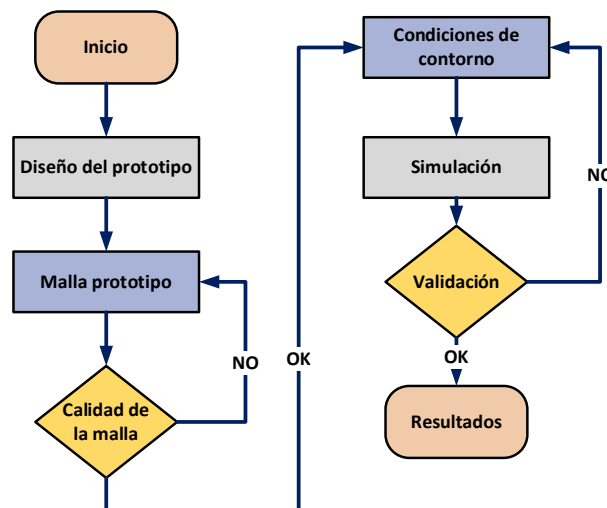


Figura 4. 1 Metodología CFD utilizada para la simulación.

El modelo físico se construye exactamente con las mismas dimensiones que el prototipo real, como se puede visualizar en la Figura 4. 2. El prototipo del deshidratador fue desarrollado en el programa ANSYS, y las propiedades de los materiales utilizados en su construcción se muestran en la Tabla 4. 1.

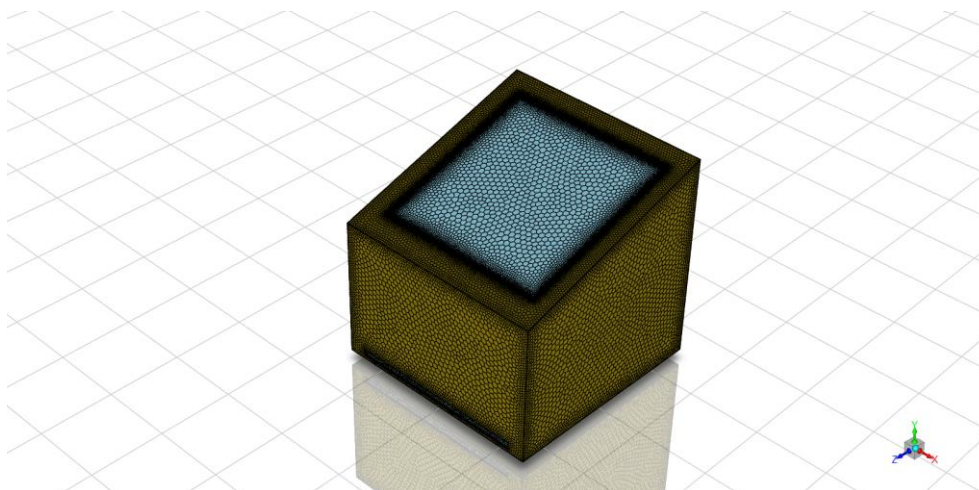


Figura 4. 2 Prototipo CFD.

Tabla 4. 1 Propiedades térmicas de los materiales.

Materiales	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)
Cristal Templado	2464.9	720	1.0073
Polietileno blanco	940	2300	0.42
Acero inoxidable	7930	500	15.5

Para el mallado se utilizó la herramienta *Mallado Fluido* y los elementos generados fueron poliedros, como se muestra en la Figura 4. 3. La métrica utilizada para determinar la calidad de la malla fue la calidad ortogonal. 169436 es el número óptimo de celdas ya que, a partir de este número, se puede ver que la temperatura se estabilizó, como se muestra en la Figura 4. 4.

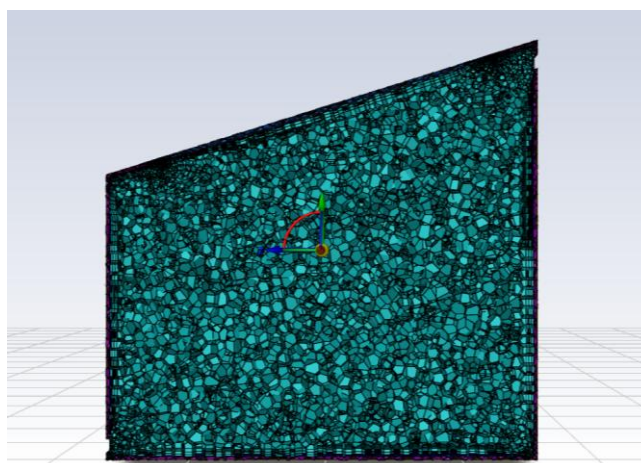


Figura 4. 3 Vista de la sección transversal de la malla.

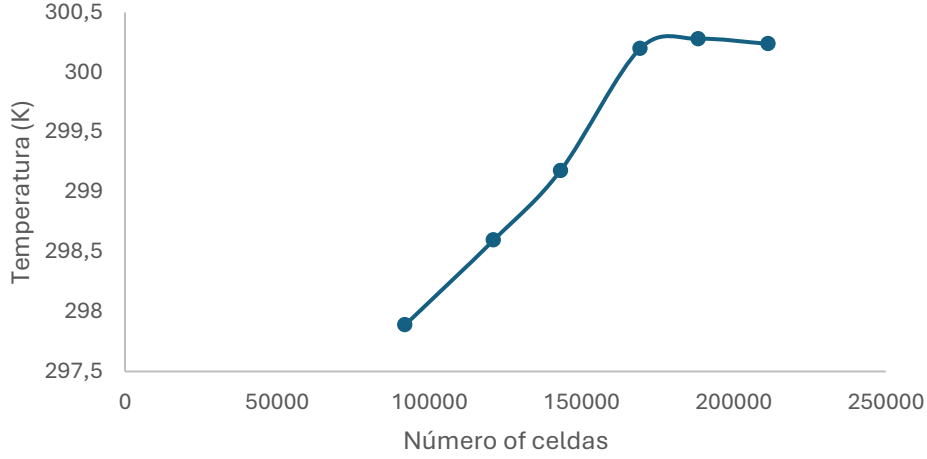


Figura 4. 4 Tamaño óptimo de malla.

Los fenómenos analizados en la simulación CFD se expresan con fórmulas matemáticas que suelen ser ecuaciones diferenciales parciales [108] para el análisis de deshidratadores en los que se produce transferencia de calor y masa: ecuación diferencial de continuidad (4.1), ecuaciones de momento diferencial (4.2, 4.3 y 4.4) y ecuación de energía diferencial (4.5) [109]:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.1)$$

Donde: $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \nabla^2 u \quad (4.2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \nabla^2 v \quad (4.3)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 w \quad (4.4)$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = K \nabla^2 T - p \nabla \cdot \vec{V} \quad (4.5)$$

El algoritmo utilizado para la solución numérica de las ecuaciones en el software es SIMPLE [67], y el método de solución para la discretización espacial de la presión utilizado es PRESTO (ANSYS 2023b). Se considera que el aire tiene un flujo laminar dentro de la cámara de deshidratación porque el número de Reynolds es menor a 2000; para calcular el número de Reynolds, se utiliza la ecuación 4.6 [110]:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (4.6)$$

Para simular los efectos de la radiación solar se utiliza el modelo de OD (ANSYS 2023a), que permite la solución de la radiación solar en paredes semitransparentes; en la ecuación 4.7 (ANSYS 2023b), se puede observar el modelo.

$$\frac{\partial(I(\vec{r}, \vec{s}))}{\partial s} = \frac{an^2(\sigma T^4)}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' - (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) \quad (4.7)$$

Debido a que el deshidratador está expuesto al medio ambiente, es necesario calcular el coeficiente convectivo. Para ello se utiliza el número de Nusselt, que es una medida adimensional del transporte de calor por convección que se relaciona con el coeficiente convectivo a través de 4.8 [110]:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (4.8)$$

Dado que la transferencia de calor del deshidratador al medio ambiente se produce por convección natural, el número de Nusselt toma la forma (4.9) [110]:

$$Nu = CGr^m Pr^n \quad (4.9)$$

donde C , m y n son constantes, el número de Grashof se define mediante la ecuación 4.10 y el número de Prandtl se define mediante la ecuación 4.11 [110].

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\omega} \quad (4.10)$$

$$Pr = \frac{\omega}{\alpha} \quad (4.11)$$

Para facilitar la simulación, se partieron de las siguientes hipótesis:

Para el aire, se utiliza la aproximación de Boussinesq porque las variaciones en la densidad del aire debido a los cambios de temperatura no superan el 20% [68] (ANSYS 2023a, 2023b). Se realizó un estudio de estado estacionario [111] y [112]. Las condiciones de contorno se presentan a continuación:

- Vidrio templado superior: el vidrio superior se sometió a radiación, y el modelo de radiación utilizado fue *radiación OD*.
- Base del prototipo: se descuidan los efectos de la convección y la radiación. sobre esta superficie, y la superficie se considera adiabática [113].
- Para los laterales, el coeficiente de convección fue de 3.2 W/m²k.
- Entrada de aire: probada a velocidades de 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 m/s.
- Presión en la salida de aire: presión atmosférica.

El prototipo se localizó en la azotea del edificio de laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Linares, Jaén como se muestra en la Figura 4. 5 b). El sistema de adquisición, cuyos componentes y funcionamiento se describen con más detalle en la sección *Diseño de hardware*, estuvo recopilando información para la simulación desde noviembre del 2021 a febrero del 2022 que coincide con la campaña de recogida de la aceituna, durante estos meses la temperatura osciló entre 273 y 288 K, con una irradiancia entre 500 y 600 W/m² en promedio.

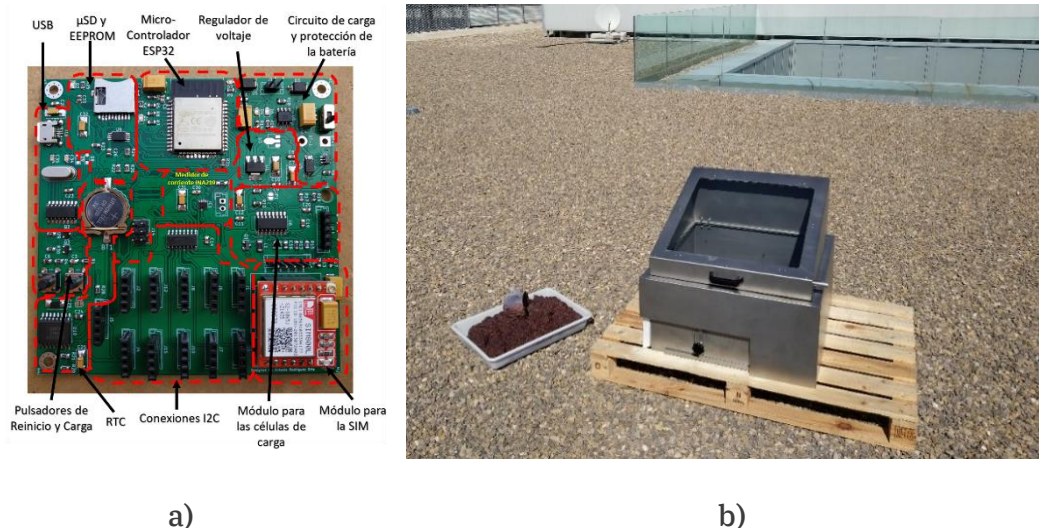


Figura 4. 5 a) Sistema de adquisición **b)** Prototipo de campo.

4.2 Modelo de red neuronal artificial

Utilizando un enfoque integral, este estudio empleó una metodología para construir un modelo robusto para predecir la temperatura dentro de una cámara de deshidratación. Este modelo se construyó considerando la influencia de varios factores ambientales.

Para recopilar los datos necesarios, se colocaron estratégicamente sensores ambientales en el área de estudio designada. Estos sensores miden parámetros cruciales como la humedad, la temperatura y la radiación. Los datos resultantes, recopilados a intervalos constantes, se almacenaron en un archivo CSV para su posterior análisis. Para facilitar el proceso de modelado, se utilizó la biblioteca *pandas* de Python para importar los datos. Posteriormente, se analizó el conjunto de datos para determinar las características relevantes. Las variables utilizadas fueron las siguientes: humedad en la zona superior del prototipo, humedad en la zona inferior del prototipo, humedad ambiental, temperatura ambiente, y la radiación solar. Además, se aisló la variable objetivo, la temperatura dentro de la cámara de deshidratación, para realizar un análisis de regresión.

Para evaluar el rendimiento del modelo, el conjunto de datos se dividió en conjuntos de entrenamiento y de prueba. Esta división se realizó utilizando la función *train-test-split* de la biblioteca *scikit-learn*. El conjunto de entrenamiento, que comprendía el 80% de los datos, se utilizó para el entrenamiento del modelo,

mientras que el 20% restante constituyó el conjunto de pruebas. Para construir el modelo de regresión, se utilizó la biblioteca *Keras TensorFlow*, que incluye una serie de capas. La capa inicial consistió en una configuración densa que incorporó las cinco variables investigadas, donde la variable de salida fue la temperatura de la cámara de deshidratación.

Las operaciones en la capa densa se pueden expresar matemáticamente mediante la ecuación 4.12 [114]:

$$y = WX + b \quad (4.12)$$

Durante la fase de entrenamiento, el modelo se optimiza y entrena utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.005 para minimizar la función de pérdida de MSE, que se muestra en la ecuación 4.13 [114].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.13)$$

El proceso de entrenamiento implica un ajuste iterativo de los parámetros del modelo en función de los datos de entrenamiento para optimizar su rendimiento. Se utilizan varios puntos de referencia para evaluar la eficacia de los modelos. Esto incluye el R^2 , que mide la proporción de varianza en la variable objetivo. Los valores R^2 se calculan para los conjuntos de entrenamiento y prueba, que proporcionan información sobre la capacidad del modelo para generalizar datos no vistos. El RMSE de la ecuación se calcula de la siguiente forma (4. 14) [114]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.14)$$

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y el índice de concordancia de Wilmot para cuantificar la precisión del modelo y la correlación con los valores de temperatura observados, y los valores de *bootstrap* se calcularon mediante las ecuaciones 4. 15 y 4. 16 [115]. Estos valores desempeñan un papel importante a la hora de proporcionar medidas cuantitativas del rendimiento del modelo desde diversos puntos de vista. Estas métricas se utilizan para comprender cómo se alinean las predicciones de un modelo con los valores reales.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}|)(|Y_i - \bar{Y}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4.15)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{X}|)(|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad (4.16)$$

Para interpretar los resultados de la red neuronal se utilizó *Shapley Additive exPlanations*, basado en la teoría de juegos, donde los valores de SHAP son una medida de la contribución de cada característica a la predicción del modelo; 4.17 nos muestra su cálculo [116].

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|! (|F| - |S| - 1)!}{|F|!} (v(S \cup \{i\}) - v(S)) \quad (4.17)$$

Los valores de pérdida obtenidos durante el entrenamiento se trazaron en función del número de épocas necesarias para obtener temp_{up} . En el segundo caso, después de múltiples pruebas, los datos deben dividirse en dos conjuntos aleatorios para ajustarse de manera eficiente al modelo, como se muestra en la Figura 4. 6. Esto se hizo para visualizar el progreso del entrenamiento y obtener información sobre el comportamiento de los participantes. Esta representación visual mejoró la comprensión del rendimiento del modelo a lo largo del tiempo y la convergencia. Esperando ver una disminución en la función de pérdida de MSE a medida que se entrena el modelo. Este hallazgo indica que el modelo aprende de los datos ajustando los eventos para reducir la discrepancia entre los valores reales y las predicciones. En algún momento, la curva de pérdidas puede comenzar a estabilizarse, lo que indica que el modelo ha alcanzado su capacidad óptima de aprendizaje con los datos proporcionados y la configuración actual.

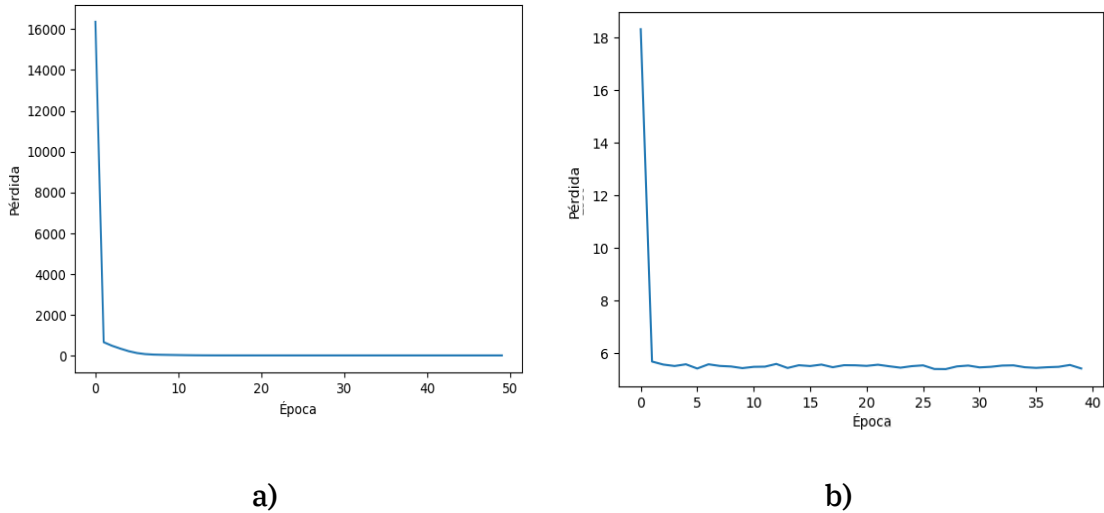


Figura 4. 6 Gráficas con el número de épocas y las pérdidas.

En general, el método propuesto incluye la recopilación de datos, el preprocesamiento, el modelado, el entrenamiento, la evaluación y la visualización. Siguiendo este enfoque sistemático, este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo de predicción de temperatura preciso y confiable basado en factores ambientales, que se puede predecir con múltiples ecuaciones de regresión lineal (4.18 y 4.19) basadas en factores ambientales.

$$\begin{aligned} \text{temp}_{\text{up}} = & -0.23 \text{ wet}_{\text{up}} + 0.17 \text{ wet}_{\text{down}} + 0.02 \text{ wet}_{\text{env}} \\ & + 1.06 \text{ temp}_{\text{env}} + 0.02 \text{ rad} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \text{temp}_{\text{down}} = & -0.04 \text{ wet}_{\text{up}} + 0.01 \text{ wet}_{\text{down}} - 0.03 \text{ wet}_{\text{env}} \\ & + 1.05 \text{ temp}_{\text{env}} + 0.02 \text{ rad} \end{aligned} \quad (4.19)$$

4.3 Resultados

4.3.1 Dinámica de fluidos computacional

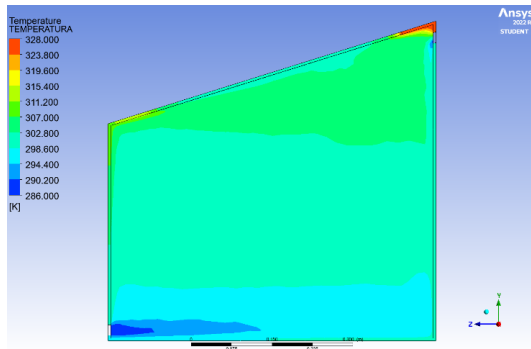
Para validar la simulación se utilizaron los resultados experimentales. En la Tabla 4. 2 se observa que entre la temperatura experimental y los resultados de la simulación, el porcentaje de MAPE no supera el 2% [107], [117], [118], lo que garantiza que los resultados de la simulación son una buena aproximación de la temperatura real en el prototipo. Para la obtención de la Tabla 4. 2 se utilizaron datos de radiación y temperatura obtenidos del prototipo y mediante simulación.

Tabla 4. 2 Resultados de la temperatura experimental y real.

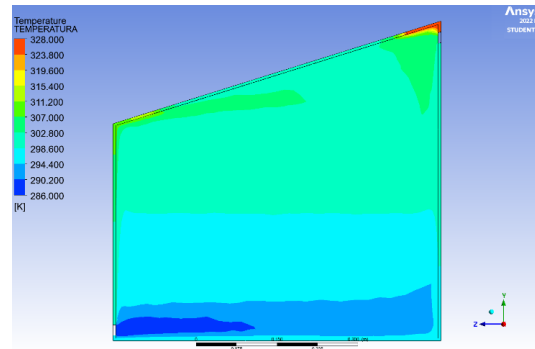
Radiación (W/m ²)	Temperatura de prueba (K)	Temperatura simulada (K)	MAPE (%)
555.90	301.24	305.59	1.44
624.65	302.55	308.12	1.84
730.21	304.17	309.32	1.69
793.06	313.33	308.51	1.54
848.61	315.05	311.43	1.15

4.3.2 Perfiles de temperatura y velocidad

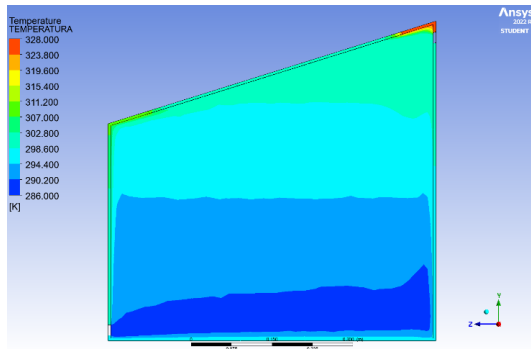
En la Figura 4. 7, se presentan las distribuciones de temperatura dentro de la cámara de deshidratación, ilustrando que las temperaturas más altas se ubican en la zona superior, mientras que la temperatura más baja corresponde al área de entrada de aire. Estas visualizaciones tienen como objetivo identificar la velocidad óptima del aire para la deshidratación, destacando el gradiente de temperatura desde el fondo hasta la parte superior de la cámara, que es crucial para determinar el proceso de deshidratación más eficiente.



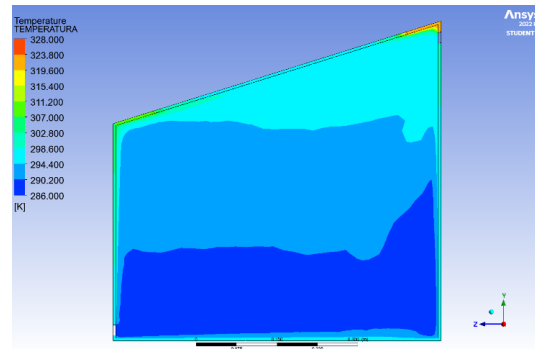
a) Perfil de temperatura en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.05 m/s.



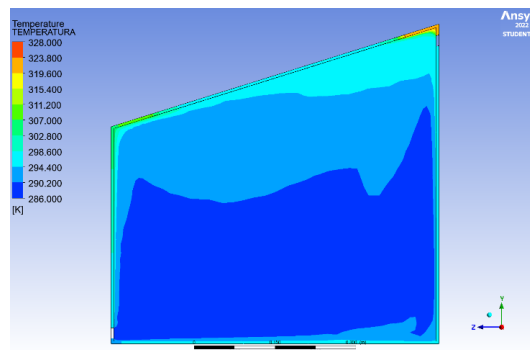
b) Perfil de temperatura en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.1 m/s.



c) Perfil de temperatura en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.2 m/s.



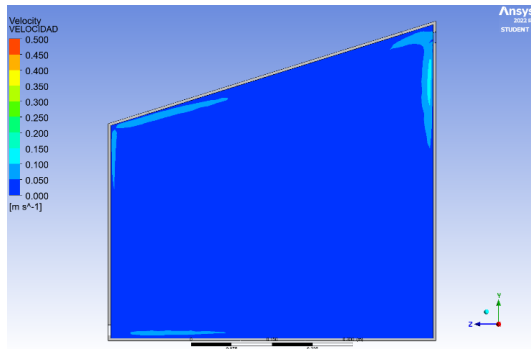
d) Perfil de temperatura en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.3 m/s.



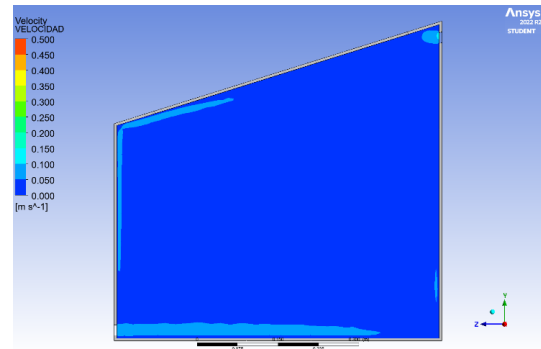
e) Perfil de temperatura en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.4 m/s.

Figura 4. 7 Distribuciones de temperatura dentro de la cámara de deshidratación.

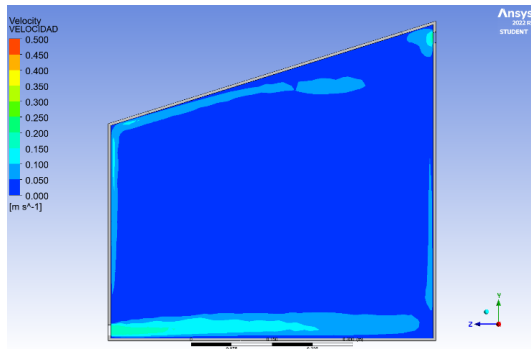
En la Figura 4. 8 se muestran las velocidades del aire dentro de la cámara de deshidratación. Se observa que la circulación del aire se produce a lo largo de las paredes de la cámara, prácticamente sin movimiento de aire en la zona central.



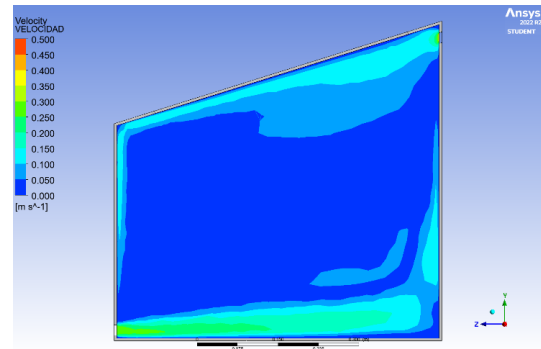
a) Perfil de velocidad en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.05 m/s.



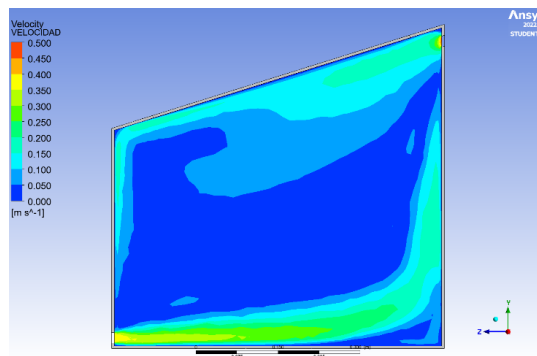
b) Perfil de velocidad en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.1 m/s.



c) Perfil de velocidad en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.2 m/s.



d) Perfil de velocidad en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.3 m/s.



e) Perfil de velocidad en la cámara de deshidratación con una velocidad del aire de 0.4 m/s.

Figura 4. 8 Distribuciones de la velocidad del aire dentro de la cámara de deshidratación.

En la Figura 4. 9 se muestra la relación entre la temperatura en la cámara de deshidratación y la velocidad de entrada del aire. A partir de los datos obtenidos, se deriva una ecuación polinómica de tercer grado, con un R^2 de 0.9988. Esto indica un buen ajuste entre las predicciones del modelo y los datos observados, lo que pone de manifiesto la fuerte correlación entre la velocidad de entrada de aire y la temperatura dentro de la cámara de deshidratación.

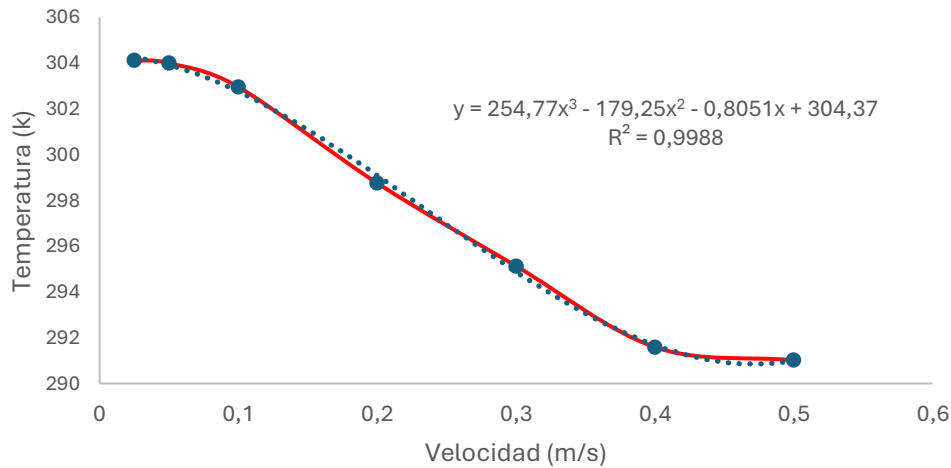


Figura 4. 9 Temperatura en la cámara de deshidratación vs velocidad de entrada del aire.

4.3.3 Modelo de red neuronal artificial

En la Tabla 4. 3 se observa que, en todos los conjuntos de datos, $temp_{up}$ y $temp_{down}$ tienen valores de R^2 elevados, superando 0.96 en todos los casos. Este hallazgo muestra que el modelo tiene un ajuste excelente, ya que puede explicar más del 96% de la variabilidad de la temperatura superior e inferior. La consistencia de los valores R^2 entre los conjuntos de entrenamiento, prueba y experimental indica que el modelo es capaz de generalizar adecuadamente nuevos datos mientras mantiene una alta precisión en sus predicciones. Por otro lado, el MSE de los datos de prueba es inferior a la de los datos de entrenamiento y experimentales, lo que indica que el modelo que mejor predice los datos es el modelo de prueba. Además, los RMSE de $temp_{up}$ y $temp_{down}$ son notablemente diferentes, siendo $temp_{down}$ el más alto en todos los casos; este hallazgo indica que las predicciones de $temp_{down}$ son más inexactas que las de $temp_{up}$, a pesar de que el modelo es preciso. Por último, la consistencia en los SD entre los conjuntos de entrenamiento y prueba para $temp_{down}$ indica que el modelo es robusto teniendo en cuenta la variabilidad de los datos obtenidos para dicha variable. El proceso se muestra en la Figura 4. 10.

Tabla 4. 3 Métricas de error del modelo.

Métricas de error	Temperatura	Entrenamiento	Test	Experimental
R^2	$temp_{up}$	0.9695	0.9712	0.9699
	$temp_{down}$	0.9719	0.9730	0.9710
MSE	$temp_{up}$	7.1380	6.7089	7.0220
	$temp_{down}$	8.2600	8.0880	8.2500
RMSE	$temp_{up}$	2.6715	2.5901	2.6556
	$temp_{down}$	4.4127	4.1111	4.4133
SD	$temp_{up}$	15.3084	15.2582	15.5984
	$temp_{down}$	13.9088	13.8573	13.8934

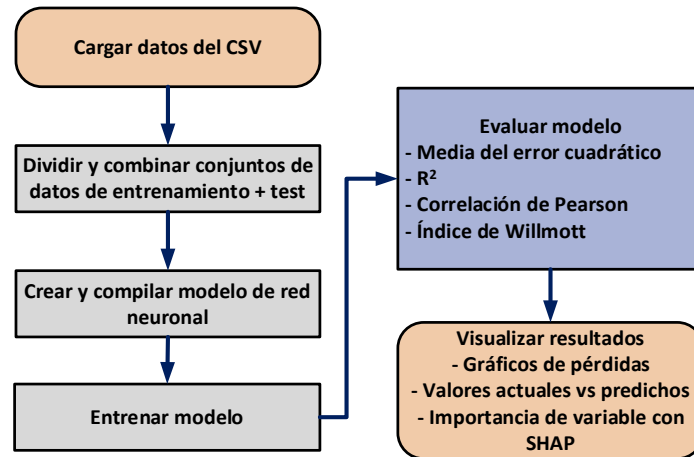


Figura 4. 10 Proceso de entrenamiento de redes neuronales.

Los puntos alineados a lo largo de la línea de identidad en las figuras 4. 12 y 4. 13, reflejan visualmente los altos valores de R^2 reportados en la Tabla 4. 3. La mínima dispersión alrededor de esta línea, especialmente en los equipos de entrenamiento y prueba, demuestra que el modelo es capaz de predecir con precisión las temperaturas en una variedad de condiciones, lo cual es esencial para su aplicación en entornos reales. La Figura 4. 13 muestra que la variable más influyente es $temp_{env}$, lo que indica que el modelo de predicción depende más de esta variable. Esto también está respaldado por el valor del coeficiente de Willmott, que es 0.9999.

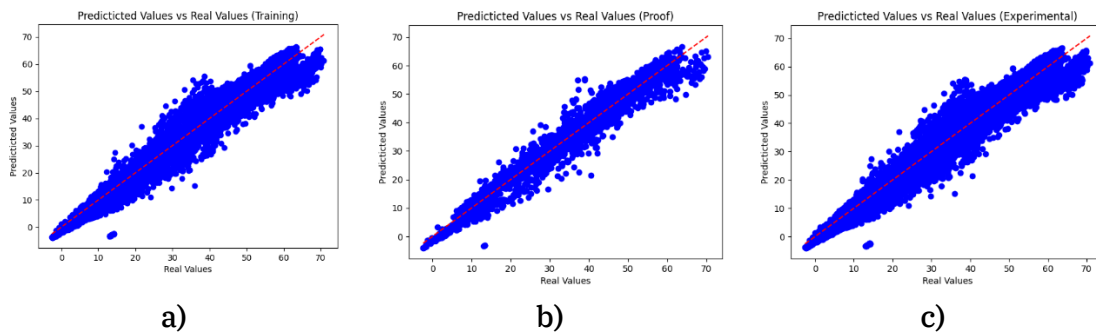


Figura 4. 11 Representación de las regresiones lineales de temperatura.

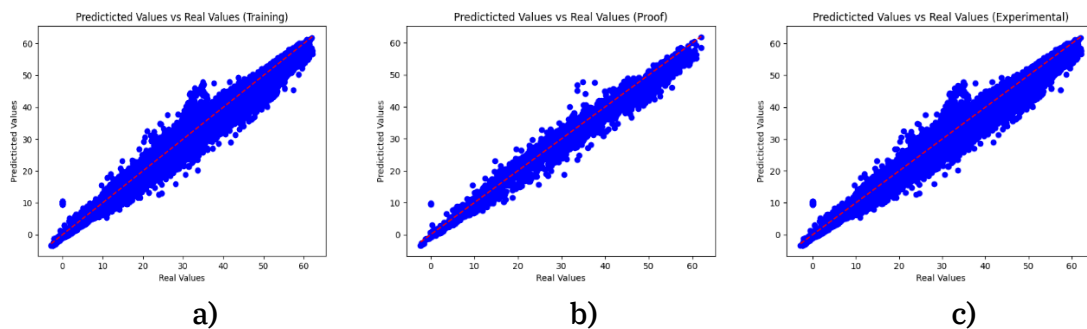


Figura 4. 12 Representación de las regresiones lineales de temperatura hacia abajo.

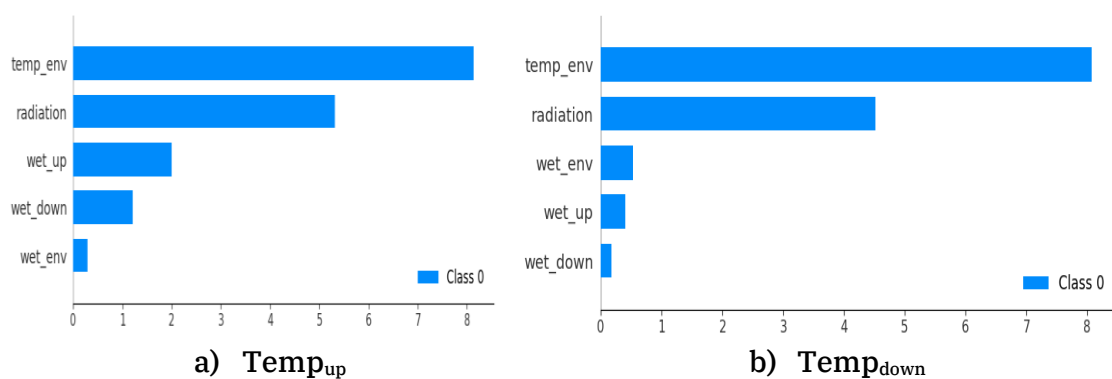


Figura 4.13 Impacto promedio en la magnitud de salida del modelo temp_{up} y temp_{down}.

4.3.4 Discusión

La simulación de nuestro prototipo proporciona datos críticos que, en circunstancias normales, solo se podrían lograr mediante el despliegue de cientos de sensores de temperatura y velocidad dentro del deshidratador. Dada la impracticabilidad de tal implementación, optamos por simular el deshidratador utilizando el software ANSYS para asegurarnos de que los datos derivados sean aproximaciones precisas. La simulación se validó con datos obtenidos de sensores de temperatura instalados en el interior de la cámara de deshidratación.

De la Figura 4.7 se puede inferir que no hay una distribución uniforme de las temperaturas del aire dentro de la cámara de deshidratación. Esencialmente, en todas las figuras se identifican tres zonas distintas: la zona inferior con una temperatura del aire cercana a la temperatura ambiente, la zona media que ocupa la mayor parte de la cámara de deshidratación, y la zona superior cerca de la salida de aire, con temperaturas del aire que van en aumento de la zona inferior a la superior. Vale la pena señalar que esta distribución es natural, como resultado de las diferencias en las densidades del aire a diferentes temperaturas.

En la Figura 4.8 se puede observar que el aire circula a lo largo de las paredes del deshidratador. Las paredes del deshidratador, al estar expuestas a la luz solar, absorben el calor y se calientan más que el aire dentro del deshidratador. Cuando el aire entra en contacto con estas paredes calientes, también se calienta, reduciendo su densidad. De acuerdo con el principio de convección natural, el aire más cálido y menos denso se eleva, creando un patrón de circulación. El aire se mueve hacia arriba a lo largo de las paredes calientes, transfiere calor dentro del deshidratador ayudando en el proceso de secado, se enfría y luego se aleja de las paredes, descendiendo para ser recalentado.

Este ciclo crea un flujo de aire continuo. El flujo de aire cerca de las paredes también es una respuesta a la geometría del deshidratador y a la trayectoria de menor resistencia. A medida que el aire se calienta y sube, sigue naturalmente los contornos de las paredes del deshidratador, que guían el aire hacia arriba. La forma del deshidratador puede mejorar este efecto, diseñado para facilitar el

movimiento ascendente a lo largo de las paredes y promover una circulación eficiente. Aunque el deshidratador funciona a través de convección forzada, los efectos de la convección natural en su funcionamiento son significativos. Para que se produzca la circulación de aire en el centro de la cámara de deshidratación, la parte inferior del deshidratador debe tener aire más caliente, de modo que la diferencia de densidades cree un flujo de aire natural. El aire más caliente de la zona inferior, al ser menos denso, se desplazaría a la parte superior, generando un mayor flujo de aire dentro del deshidratador, asegurando así que el proceso de deshidratación se lleve a cabo de manera eficiente. Para ello, se necesita una fuente de calor en la zona inferior.

Analizando la Figura 4. 9, se observa que a partir de 0.1 m/s hacia la izquierda, la pendiente de la curva disminuye, lo que significa que una reducción de la velocidad no provoca un aumento significativo de la temperatura del aire. A la derecha de esta velocidad, se puede ver que cuanto mayor es la velocidad del aire, menor será la temperatura, ya que el tiempo de residencia del aire dentro de la cámara de deshidratación será menor y, en consecuencia, la transferencia de calor también será menor. Este hallazgo subraya la importancia de equilibrar la velocidad del aire para maximizar la transferencia de calor sin comprometer la eficiencia térmica del proceso.

En este estudio, se desarrolló un modelo de predicción de temperatura utilizando una red neuronal de una sola capa y factores ambientales como variables de entrada. El modelo mostró un alto rendimiento y precisión en predicción de las temperaturas superior e inferior de la cámara de deshidratación. El modelo se validó con varios conjuntos de datos y medidas estadísticas, como el R^2 , el coeficiente de correlación de Pearson, el índice de concordancia de Willmott, el MSE y el RMSE. Al integrar el análisis visual de los gráficos con las métricas cuantitativas, podemos concluir que el modelo tiene un buen rendimiento predictivo para ambas variables de temperatura. La consistencia entre los conjuntos de entrenamiento, prueba y experimental sugiere que el modelo es robusto y generalizable a nuevas condiciones.

La alineación de los puntos a lo largo de la línea de identidad en las figuras 4. 11 y 4. 12 muestra que la dispersión es un reflejo visual de los altos valores de R^2 informados en la Tabla 4. 3. La dispersión mínima alrededor de esta línea, especialmente en los conjuntos de entrenamiento y prueba, indica que el modelo es capaz de predecir con precisión las temperaturas en un rango variado de condiciones, lo cual es esencial para su aplicación en entornos reales.

Los resultados mostraron que el modelo puede capturar las complejas relaciones entre los factores ambientales y la temperatura, proporcionando predicciones confiables para varios escenarios. Esta información se puede utilizar para ajustar los parámetros de diseño o las condiciones de funcionamiento para mejorar el rendimiento y la eficiencia y, por lo tanto,

optimizar el proceso de deshidratación. El modelo se puede utilizar para desarrollar estrategias de control para deshidratadores que puedan mantener el rango de temperatura deseado y evitar el sobrecalentamiento o el enfriamiento. Por ejemplo, un modelo puede integrarse con un sistema de control de retroalimentación que ajuste los caudales de aire o los ángulos del colector en función de los valores de temperatura previstos.

En general, el modelo de predicción de temperatura desarrollado en este estudio es una herramienta valiosa para los investigadores y profesionales en el campo del secado solar y los sistemas de energía renovable. Este modelo proporciona un método confiable y preciso para predecir los valores de temperatura en función de factores ambientales, nos permite optimizar el diseño del sistema, aumentar la eficiencia, reducir costes y mejorar la calidad del producto.

4.3.5 Conclusiones y recomendaciones

Se desarrolló una metodología que permitió la simulación del deshidratador solar pasivo de orujo de aceituna mediante CFD, variando las velocidades de entrada de aire a la cámara de deshidratación. Esto permitió observar las temperaturas alcanzadas a diferentes velocidades y cómo se distribuye la temperatura del aire en su interior, concluyendo que la velocidad óptima de entrada de aire al deshidratador es de 0.1 m/s.

Se utilizó un modelo de red neuronal artificial, que procesó los datos obtenidos por los sensores encontrados en el prototipo físico. El modelo incluyó como variables de entrada: radiación solar, temperatura ambiente y humedad del aire tanto en el exterior como en el interior de la cámara de deshidratación de la sala. Este análisis permitió determinar que las variables que más influyen en la temperatura de la cámara de deshidratación son la radiación solar y la temperatura del aire ambiente. Además, se determinó un modelo que permite optimizar el proceso de deshidratación. El análisis del modelo predictivo para optimizar el proceso de deshidratación tiene un coeficiente de correlación de 0.9699 para $temp_{up}$ y de 0.9710 para $temp_{down}$, y un coeficiente de Willmott de 0.9999, demostrando una alta concordancia entre las predicciones del modelo y los datos experimentales.

Para aumentar la velocidad de secado y, por lo tanto, aumentar el proceso de extracción de agua, las investigaciones futuras deben incluir la construcción de un suelo térmico en la zona de secado, donde se podría instalar un serpentín por el que circule agua calentada por un colector solar. Este sistema aumentará considerablemente la temperatura del residuo y por tanto su velocidad de secado. Además, al disponer de una temperatura más alta en la parte inferior de la cámara que en la parte superior, se fomenta el movimiento natural del aire dentro de la cámara.

La validación experimental de los resultados obtenidos a través de simulaciones CFD y modelos de aprendizaje profundo es crucial para garantizar la fiabilidad y precisión de los enfoques propuestos, lo que subraya la importancia de integrar la teoría con la práctica en la investigación científica y tecnológica.

Este trabajo sienta las bases para el análisis predictivo profundo. Sin embargo, el camino hacia la mejora y el crecimiento es vasto y prometedor. La optimización de hiperparámetros, la exploración de arquitecturas de red más complejas, la evaluación comparativa con otros modelos de aprendizaje automático, el avance en la interpretación de modelos, la implementación de técnicas sólidas de validación cruzada, la experimentación con el preprocesamiento de datos y la integración de nuevas fuentes de información son algunas de las futuras direcciones de investigación. Además, al analizar la dependencia temporal de los datos, explorar estrategias para la implementación y el monitoreo de modelos en entornos de producción son áreas cruciales para futuras investigaciones. Estos esfuerzos no solo aumentarán la aplicabilidad y la precisión del modelo actual, sino que también aumentarán la comprensión de los sistemas complejos que estamos tratando de modelar, abriendo nuevas oportunidades para el análisis predictivo en varios campos de aplicación.

Este enfoque innovador abre nuevos caminos para la investigación y el desarrollo de procesos en la industria, promoviendo el uso de energías renovables y técnicas de inteligencia artificial para lograr procesos más sostenibles y eficientes.

Capítulo 5

Sistema de control automatizado y monitorización en tiempo real de bajo coste para un gasificador portátil de tiro descendente a escala de laboratorio

En este capítulo se presenta una solución tecnológica orientada al aprovechamiento energético de residuos agroalimentarios: la gasificación de biomasa para la generación de *gas producto*. El sistema desarrollado consiste en un gasificador portátil de bajo coste, diseñado para combinar eficiencia operativa y facilidad de uso, integrando un sistema de control y monitorización en tiempo real. Esta plataforma, adaptable a distintos tipos de biomasa, permite la gestión remota mediante una interfaz gráfica intuitiva, lo que facilita su ajuste dinámico según las necesidades del proceso. En su desarrollo se detallan tanto el diseño del hardware (incluyendo la selección justificada de sensores) como el desarrollo del software de control. Finalmente, se evalúa el desempeño del sistema a través de dos pruebas experimentales orientadas a alcanzar y mantener temperaturas específicas, según el tipo de combustible empleado.

5.1 Caracterización de la biomasa y elección del agente gasificante

Los procesos de gasificación de biomasa son inherentemente complejos debido a su comportamiento multivariable y no lineal, así como a la variabilidad de las propiedades de la biomasa, como su composición química, contenido de humedad y tamaño de partícula. En los experimentos presentados en este trabajo, se utilizaron pellets de alperujo como materia prima los cuales se pueden observar en la Figura 5. 1 y cuyas propiedades fisicoquímicas pueden consultarse en la Tabla 5. 1, con información obtenida de un estudio previo de algunos de los autores del artículo del que parte este capítulo [79]. Se utilizó aire como agente gasificante debido a su disponibilidad y bajo coste [78], [79]. El gas resultante de la gasificación con aire es un gas combustible con un alto contenido de gases inertes, conocido como *gas pobre o gas producto*. A pesar de su relativamente bajo poder calorífico, sigue siendo adecuado para la generación de energía mediante motores de combustión interna (ICEs) [81], [119].



Figura 5. 1 Pellets de orujillo utilizados como materia prima para la planta de gasificación.

Tabla 5. 1 Propiedades fisicoquímicas de los pellets de orujo [79]

Análisis inmediato, wt. %	Mínimo	Medio	Máximo
Humedad, como se recibió	4.80	9.88	13.80
Ceniza, base seca	5.40	7.20	9.20
Materia volátil, base seca	70.24	73.53	76.67
Carbón fijo, base seca	16.43	19.27	22.36
Análisis elemental, wt. %	Mínimo	Medio	Máximo
Carbón	47.49	51.02	55.44
Hidrógeno	5.26	5.88	6.50
Nitrógeno	0.40	0.95	2.20
Azufre	0.07	0.14	0.24
Cloro	0.12	0.26	0.40
Oxígeno (calculado por diferencia)	31,04	34.55	38.86
Poder calorífico superior (PCS), MJ/kg	Mínimo	Medio	Máximo
Base húmeda	17.64	18.81	19.98
Base seca	19.12	20.07	20.94
Poder calorífico inferior (PCI), MJ/kg	Mínimo	Medio	Máximo
Base húmeda	16.06	17.23	18.44
Base seca	17.68	18.61	19.55
Densidad aparente (ρ_r), kg/m³	Mínimo	Medio	Máximo
Base húmeda	681.3	698.7	716.1

5.2 Diseño del gasificador de biomasa

Entre las diversas alternativas disponibles, en este estudio se seleccionó un reactor de lecho fijo de corriente descendente por las razones expuestas en la sección *La gasificación de biomasa, tipologías de gasificadores*. La altura del reactor es de 1.4 m, lo que facilita su transporte. Este reactor utiliza la gravedad como fuerza impulsora para mover el combustible desde la tolva de alimentación (sección superior) hasta la zona de combustión (sección inferior), donde se alcanzan las temperaturas más altas [75]. En este estudio, se empleó un reactor de corriente descendente con una constricción en la zona de combustión. La

inclusión de una zona de constricción obliga a los productos de la pirólisis a pasar por un conducto estrecho, donde se produce la combustión en un proceso conocido como *pirólisis*, lo que reduce la formación de alquitrán [75], [91]. Además, se alcanzan temperaturas superiores a 800 °C, promoviendo reacciones de craqueo térmico que reducen significativamente el contenido de alquitrán en el gas producto [120]. Esta reducción en el contenido de alquitrán es fundamental, no solo para mejorar la calidad del gas producido, sino también para reducir los costes de operación y mantenimiento, ya que los depósitos de alquitrán pueden provocar obstrucciones y daños en los equipos.

El proceso de gasificación genera un gas combustible, conocido como *gas pobre*, que puede utilizarse para alimentar un grupo electrógeno y generar electricidad [81]. Sin embargo, algunas impurezas contenidas en el gas producto caliente, como las cenizas volantes, el alquitrán y la humedad, pueden condensarse en las secciones de baja temperatura y adherirse a las superficies internas del sistema, lo que provoca graves problemas de ensuciamiento y corrosión [79]. Por esta razón, el sistema incorpora elementos de acondicionamiento y filtración de gases aguas abajo del reactor, lo que garantiza un funcionamiento continuo sin frecuentes interrupciones de mantenimiento [76]. Otra consideración de diseño es la elevada temperatura a la que se genera el gas producto, que puede ser perjudicial para el grupo motor-generator. Para mitigar este problema, se utiliza un intercambiador de calor para reducir la temperatura de salida. Todos estos componentes, incluidos los sensores, los actuadores, el equipo de filtración de gas y los componentes de adaptación, se ilustran esquemáticamente en la Figura 5. 2.

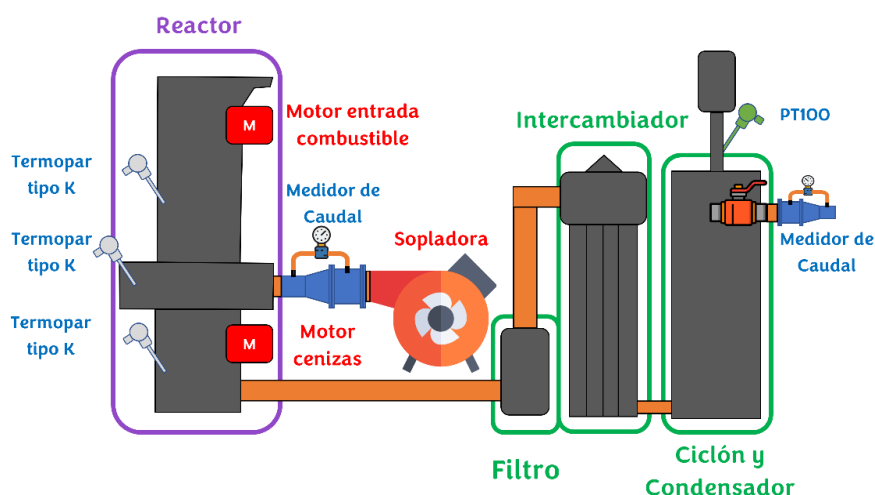


Figura 5. 2 Descripción general del ensamblaje del prototipo, destacando sus componentes principales.

Durante el funcionamiento, la temperatura de gasificación se ajusta cuidadosamente regulando el caudal de aire para lograr un equilibrio entre el poder calorífico y la producción de producto. Esta regulación de temperatura se puede ajustar para adaptarse a las variaciones en la composición de la biomasa,

incluido el contenido de humedad, el contenido de cenizas y la densidad de energía, que influyen significativamente en el rendimiento del proceso de gasificación. La interfaz gráfica programable del sistema permite a los usuarios modificar manual o automáticamente los puntos de ajuste de temperatura y las tasas de calentamiento manipulando el funcionamiento de los diferentes motores, proporcionando así un control en tiempo real sobre el proceso de gasificación.

La descomposición de biomasa en condiciones de operación subestequiométricas genera una densa niebla compuesta de vapor de agua y alquitrán que se adhiere a las paredes del sistema y es transportada corriente abajo por el flujo continuo de gas. El gas pobre sale del reactor de gasificación a alrededor de 400 °C [79], y contiene partículas, condensados, alquitrán y vapor de agua [91]. Este gas pobre caliente debe enfriarse y limpiarse, asegurándose de que esté virtualmente libre de alquitrán, vapor de agua y partículas, y a una temperatura cercana a la ambiente si se va a utilizar en un motor de combustión interna [91]. En este estudio, se incluye un sistema compacto de acondicionamiento de gas pobre para soportar una operación prolongada con un mantenimiento reducido (ver Figura 5. 2). Este sistema consta de un intercambiador de calor de flujo en contracorriente de gas-aire que reduce la temperatura de los gases de escape de 400°C a aproximadamente 50°C, adecuado para el grupo motor-generator; un ciclón que redirige parte del flujo de aire de entrada a la salida del intercambiador de calor para evitar la acumulación de partículas en el condensador; un condensador que atrapa los contaminantes en el fondo de un contenedor para evitar que circulen por las tuberías; y una caja de recolección de cenizas con una puerta removible para facilitar la extracción de los residuos acumulados después de varias horas de funcionamiento.

5.3 Operación de la planta

La operación de la planta sigue el diagrama que se muestra en la Figura 5. 3 y que se detalla a continuación:

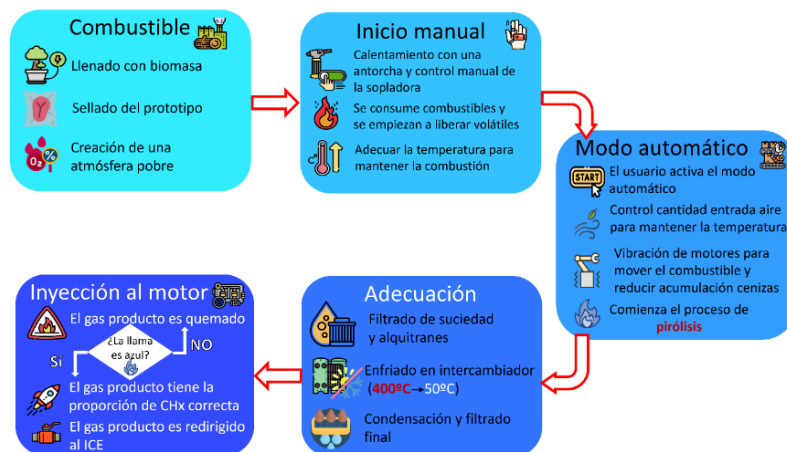


Figura 5. 3 Diagrama del ciclo de operación de la planta.

El primer paso es cargar el reactor con la biomasa, en este caso pellets de orujillo, y sellarlo de forma segura para evitar fugas de aire [121]. Un sellado adecuado es esencial para mantener el control sobre las condiciones internas del reactor, ya que el ventilador centrífugo es el único componente responsable de inyectar aire en el reactor. Para garantizar que el gas producto sea utilizable para aplicaciones de generación de energía y contenga una cantidad mínima de contaminantes, el objetivo es lograr una reacción de descomposición química de la materia orgánica en condiciones subestequiométricas [75]. Las reacciones de gasificación ocurren a temperaturas elevadas en una atmósfera pobre en oxígeno, lo que refleja la importancia primordial de un sellado hermético [122], [123], [124].

Tras el sellado se inicia la combustión manualmente, un proceso que dura aproximadamente 10 minutos según el contenido de humedad de la materia prima [79]. En esta etapa, una antorcha proporciona calor y el ventilador inyecta la mayor cantidad de aire posible, favoreciendo así la distribución del calor y la formación de la primera capa de partículas carbonizadas en la cámara de combustión. Una vez que el proceso se ha vuelto autosostenible, el usuario puede cambiar al modo automático. En este modo, el sistema regula automáticamente la entrada de aire al reactor ajustando el caudal de aire en función de la retroalimentación de los sensores de temperatura integrados en el reactor. El objetivo del sistema electrónico es mantener la operación dentro de los rangos de temperatura establecidos, facilitando el movimiento por gravedad de la materia prima a través de las diferentes secciones del reactor, al mismo tiempo que se eliminan los depósitos de ceniza de las paredes mediante vibraciones generadas por un motor colocado en la zona superior y otro en el fondo del reactor.

Durante el proceso de gasificación de biomasa, es esencial mantener la temperatura en la zona de combustión en torno a los 800 °C para proporcionar el aporte de calor necesario para las reacciones endotérmicas de pirólisis y reducción, así como para minimizar la producción de alquitrán [34], [125], [126]. El alquitrán es perjudicial tanto para el medio ambiente como para la unidad de generación de energía, reduciendo así su vida útil [120]. El gas pobre del reactor se encuentra a temperaturas elevadas y puede contener impurezas, lo que requiere un pretratamiento antes de poder utilizarse en un motor. La filtración elimina impurezas como polvo, alquitrán y humedad, que pueden obstruir el colector de admisión del motor y aumentar los requisitos de mantenimiento. El intercambiador de calor reduce la temperatura del gas de aproximadamente 400 °C en la salida del reactor a alrededor de 50 °C, lo que lo hace adecuado para el funcionamiento del motor. Después de la etapa de acondicionamiento, el sistema está equipado con una válvula en T que permite que el gas producto sea dirigido hacia la antorcha o hacia el grupo electrógeno. Un método eficaz para determinar si el gas resultante dispone de un valor calorífico adecuado es quemándolo. Si la llama es de color azul indica que el gas es apropiado para su uso como

combustible [79], evitando así la necesidad de un costoso analizador de gases, de ahí la existencia de la antorcha final.

5.4 Diseño del hardware e implementación

Los sensores de temperatura y flujo de aire se colocaron estratégicamente para evaluar el rendimiento del prototipo y determinar si cumplen con las especificaciones de diseño. Estos sensores proporcionan datos en tiempo real sobre el estado del sistema, lo que permite la implementación de las acciones necesarias para estabilizar la reacción de pirólisis. El parámetro clave para mantener esta reacción es la temperatura de combustión. El reactor, junto con la unidad de control, debe mantener la temperatura a aproximadamente 800 °C, con un rango estrecho permitido (± 25 °C). La estabilidad de la temperatura depende del volumen de aire introducido como oxidante. La unidad de control ajusta la señal de control mediante modulación de ancho de pulso (PWM) del ventilador centrífugo en función de los datos proporcionados por los sensores de temperatura. A diferencia del control de todo o nada, donde el sistema funciona solo en estados de potencia máxima o nula, el PWM permite el ajuste continuo de la energía sin incurrir en las pérdidas térmicas significativas asociadas con la regulación lineal. Esto se debe a que los dispositivos de conmutación utilizados en PWM funcionan en modos de saturación o corte, minimizando la disipación de energía [127]. Además, el PWM ofrece una respuesta más eficiente en términos de estabilidad y control de velocidad, reduciendo las fluctuaciones bruscas de presión y permitiendo una mejor adaptación a las condiciones dinámicas del sistema. Esta característica es esencial en aplicaciones que requieren una regulación precisa del caudal sin introducir perturbaciones adicionales en la medición [128].

5.4.1 Sensores

Se seleccionaron sensores de grado industrial para caracterizar el prototipo de gasificador de biomasa. Estos sensores cuentan con carcasas especialmente diseñadas y selladas para funcionar en entornos con contaminantes, como polvo y salpicaduras. También incorporan transductores con el estándar industrial 4-20 mA, que son conocidos por su inmunidad al ruido electromagnético generado por los motores [129], [130]. En el prototipo, las posibles fuentes de ruido electromagnético que podrían afectar negativamente a la instrumentación incluyen los motores responsables de desalojar las cenizas de las paredes del reactor, lo que facilita el descenso del combustible a la cámara de combustión, así como el motor del ventilador centrífugo.

Se colocaron termopares tipo K, con un rango de temperatura de 0 a 1200 °C, en diferentes secciones a lo largo del eje vertical del reactor [131]. Además, se eligió un sensor PT100, con un rango de temperatura de 0 a 100 °C, para monitorear el desempeño del intercambiador de calor, asegurando que la temperatura se reduzca a aproximadamente 50 °C. El sensor PT100 proporciona

una resolución más alta dentro de su rango de operación que los termopares, lo que justifica el cambio en el tipo de sensor. Se utilizaron sensores de presión diferencial acoplados a tubos Venturi de tamaño adecuado para medir el flujo de aire en la entrada y la salida del prototipo. Esta configuración generó una variación de presión (ΔP) proporcional al caudal de aire (Q), como se indica en 5.1:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{Q^2 \rho (A_1^2 - A_2^2)}{2 A_1^2 A_2^2} \quad (5.1)$$

donde A denota el área de la sección transversal interna del tubo y ρ representa la densidad del gas. Los subíndices 1 y 2 corresponden a la sección cónica convergente y a la sección de garganta del caudalímetro Venturi, respectivamente. Esta combinación es preferible en entornos industriales para fluidos propensos a la contaminación, donde otros dispositivos de medición, como los rotámetros, no funcionan.

5.4.2 Actuadores

Para garantizar un funcionamiento eficiente del gasificador, se integraron varios componentes físicos para mejorar el rendimiento y el control del sistema. El ventilador centrífugo ajusta la temperatura de combustión regulando el caudal de aire inyectado en el reactor, lo que aumenta el agente oxidante y permite temperaturas de combustión más altas. Los motores agitadores evitan la acumulación de combustible de origen vegetal en las paredes del reactor, lo que promueve su movimiento hacia la zona de combustión por gravedad y evita la acumulación de cenizas. Además, una válvula en T conectada a una chimenea redirige el gas pobre para su incineración en una antorcha o al colector de admisión del motor en función de color de la llama obtenido en la prueba. La llama debe volverse azul para confirmar que el gas está suficientemente limpio y libre de alquitrán. Esta configuración permite la verificación en tiempo real de que se ha alcanzado la temperatura de reacción objetivo, aproximadamente 800°C.

5.4.3 Sistema de control inalámbrico

La recopilación de datos se realizó de forma inalámbrica, lo que permitió a los operadores interactuar con el sistema en tiempo real, incluso en modo manual, sin necesidad de abrir la carcasa sellada de la unidad de control. A pesar de la naturaleza inalámbrica de la transmisión de datos, es fundamental mantener una comunicación segura entre el sistema y la computadora sin pérdida de datos. Se desarrolló una interfaz web para ayudar a visualizar los datos y controlar los diversos componentes del sistema. A través de esta interfaz, los usuarios pueden acceder al histórico de registros de medición, calibrar sensores, ajustar parámetros de control y establecer temperaturas objetivo.

El sistema se diseñó para monitorear y controlar el prototipo de forma autónoma, aunque se requiere encendido manual durante la fase inicial. Todas

las mediciones y entradas del actuador se almacenaron localmente en una tarjeta microSD, con marcas de tiempo. Con cada nueva recopilación de datos, estas mediciones se actualizan y se muestran en la interfaz web gráfica del usuario, lo que permite la detección de irregularidades y la monitorización del rendimiento general del sistema.

El sistema de control comprende una unidad de control, un reloj de tiempo real, una ranura para tarjeta microSD, conectores para los sensores de 4-20 mA, un sistema de suministro de energía y elementos consumidores de energía. Estos elementos incluyen relés para el accionamiento del motor (sin regulación) y una etapa de potencia para el control preciso del motor del ventilador. En la Figura 5. 4 se ilustra un diagrama esquemático del sistema de control.

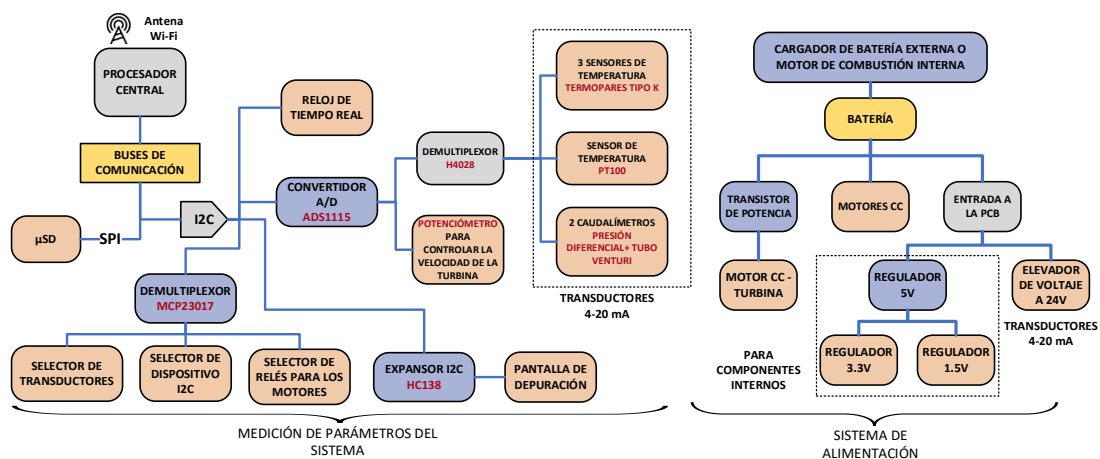


Figura 5. 4 Diagrama esquemático de los elementos principales del hardware.

El componente principal de la unidad de control es un microcontrolador ESP32 (Espressif Systems). Este sistema en chip (SoC) integra dos procesadores de alto rendimiento y cuenta con diversos modos de bajo consumo, en los cuales se pueden desactivar los núcleos principales y activar un coprocesador de ultra bajo consumo (ULP), diseñado para tareas simples con mínima demanda energética. Esta configuración ofrece capacidades computacionales robustas al tiempo que optimiza el consumo de energía.

El ESP32 es compatible con múltiples protocolos de comunicación, incluidos SPI e I²C, esenciales para la interconexión de sensores y actuadores dentro de un sistema [132], [133]. Además, admite conectividad inalámbrica en la banda de 2.4 GHz, integrando transceptores Wi-Fi (802.11 b/g/n) y Bluetooth v4.2 (BR/EDR y BLE), que facilitan la transmisión de datos y la monitorización remota

La placa de circuito impreso se complementa con componentes clave adicionales, como se muestra en la Figura 5. 5. Estos elementos mejoran la funcionalidad y la confiabilidad de la unidad de control, asegurando así el funcionamiento eficiente del sistema de gasificación. La PCB integra circuitos de

administración de energía para estabilizar el suministro de voltaje, módulos de acondicionamiento de señal para los sensores e interfaces de comunicación para garantizar un intercambio de datos confiable entre el microcontrolador y los periféricos.

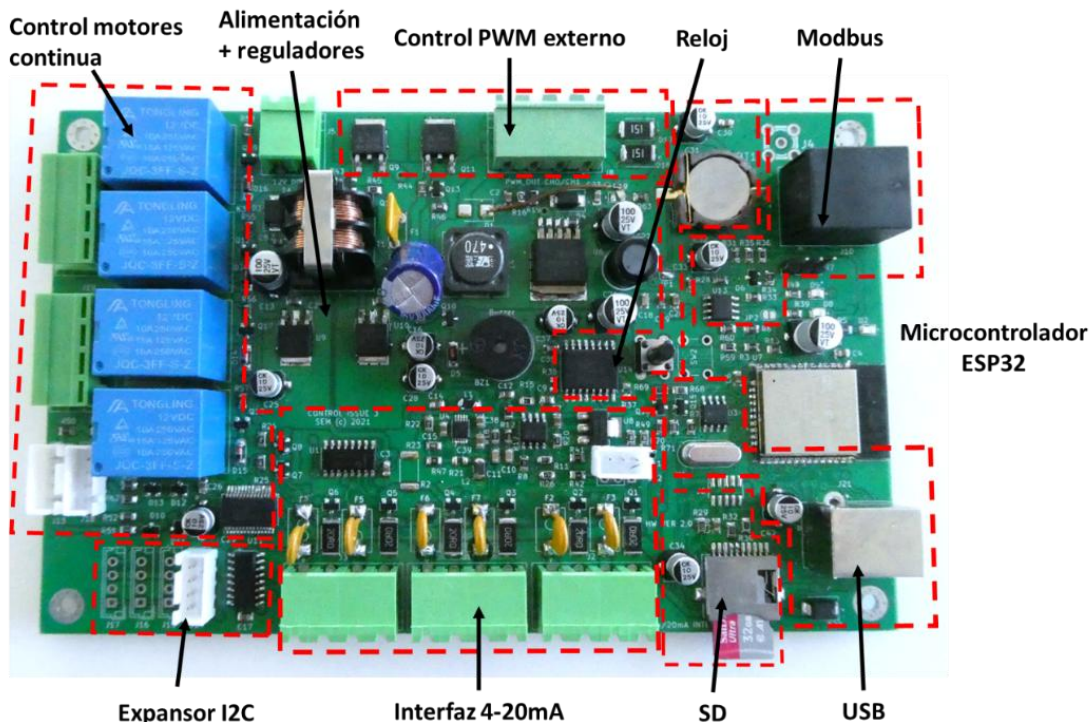


Figura 5.5 Prototipo de la unidad de control - Hardware.

La incorporación de un microcontrolador ESP32 en el diseño de la unidad de control proporciona una plataforma versátil capaz de gestionar tareas de control complejas y procesamiento de datos en tiempo real. Sus capacidades de comunicación inalámbrica también permiten el control y la supervisión a distancia, que son fundamentales para optimizar el rendimiento y la seguridad del proceso de gasificación. La integración de estas características en un diseño compacto y energéticamente eficiente subraya la idoneidad del ESP32 para aplicaciones industriales como la gasificación de biomasa.

5.4.4 Medida de temperatura y flujo de gas

Para medir la temperatura y el caudal de gas, el sistema de instrumentación emplea sensores industriales que incorporan transceptores estándar de 4 a 20 mA. Estos transceptores requieren una tensión de alimentación de 24 V, que se proporciona mediante un elevador de tensión integrado en el sistema. Los sensores consumen una energía mínima, por lo que no es necesario un suministro de corriente elevado.

La temperatura se midió dentro del reactor utilizando tres termopares tipo K ubicados en sus diferentes zonas; secado-pirólisis, oxidación y reducción [99], [100]. Se utilizó un sensor PT100 en la salida de gas del sistema para garantizar

que el intercambiador de calor funcionara correctamente y que el gas producto pudiera introducirse de forma segura en el motor de combustión interna sin causar daños. Se utilizaron sensores de presión diferencial acoplados a un tubo de Venturi para medir el caudal de aire de entrada y el caudal de gas de síntesis a la salida. La diferencia de presión ($\Delta P = P_1 - P_2$) permite el cálculo directo del caudal de fluido (Q), como se indica en 5.2:

$$Q = A_1 A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (5.2)$$

Para optimizar el diseño y reducir el tamaño del hardware de medición, el sistema de instrumentación empleó un único convertidor analógico a digital (A/D) ADS1115, lo que requirió el uso de un demultiplexor para todas las entradas analógicas de 4-20 mA.

Los transceptores no están diseñados para un funcionamiento inmediato; requieren un tiempo de estabilización de aproximadamente 6 segundos después de ser encendidos, lo que suma un total de aproximadamente 36 segundos para los seis sensores. Para evitar este retraso, se utilizó una resistencia conectada al polo negativo de cada transceptor para alimentarlo continuamente. Cuando se requiere una muestra de datos, un multiplexor redirige la corriente desde cada entrada al convertidor A/D sin interrumpir el funcionamiento. Este enfoque permite la medición instantánea de todos los parámetros.

Para verificar el comportamiento y la linealidad del sistema en respuesta a los cambios en el caudal y la temperatura, cada sensor fue calibrado en el laboratorio. Este proceso incluyó la instalación de diferentes válvulas que redirigían el flujo de aire hacia el medidor de caudal o hacia fuera para regular el caudal de entrada de aire. La reducción en la sección transversal de las mangueras de aire fue considerada en los cálculos porque impone una limitación en el caudal máximo que puede ser suministrado por el ventilador. Los manómetros diferenciales fueron calibrados con un ventilador de alta potencia, superior a la potencia del ventilador finalmente instalado en el prototipo, junto con un medidor de presión capaz de medir hasta 200 slm (12 m³/h).

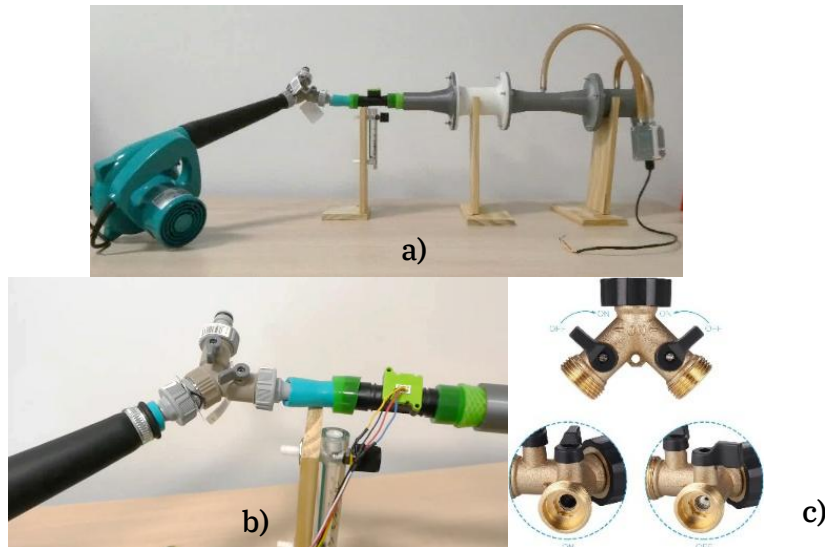


Figura 5. 6 a) Montaje completo para la medición y calibración del caudal. b) Detalles del divisor de flujo y del medidor de flujo de referencia (SFM3000). c) Funcionamiento de la válvula en Y.

Para la calibración de la temperatura, se utilizó un sensor PT100 calibrado y un termopar tipo K (RS Amidata) que se conectaron a una estación de soldadura de aire caliente. El proceso de calibración también incluyó la utilización de agua a 0 °C y 100 °C.

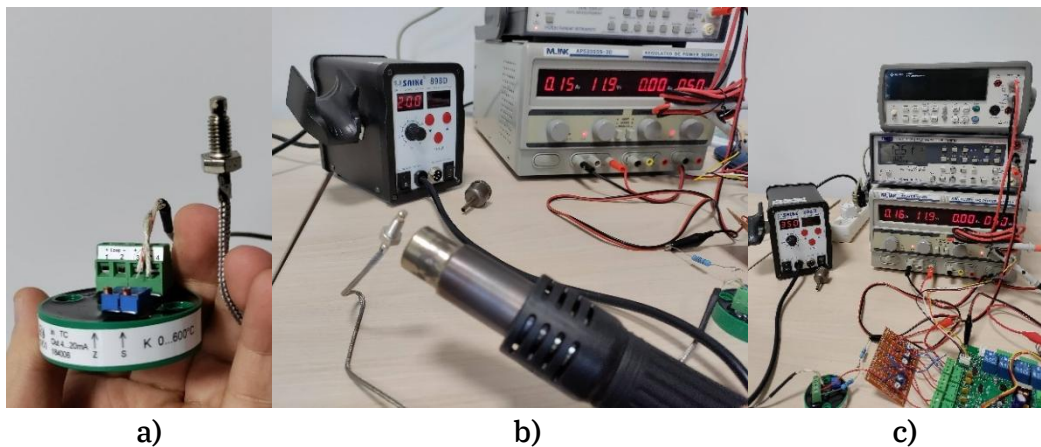


Figura 5. 7 Configuración de medición de temperatura. a) Termopar tipo K más transductor b) Estación de soldadura de aire caliente. c) Conexión del sistema de control.

5.4.1 Alimentación del sistema

El sistema se alimenta mediante una batería de gel diseñada para sistemas fotovoltaicos, que proporciona una tensión de 12V y puede suministrar una corriente elevada. Una vez arrancado el grupo electrógeno, la batería se puede cargar mediante un panel fotovoltaico o mediante el propio sistema. Durante los experimentos, la batería se cargó en el laboratorio mediante un cargador de batería móvil.

El sistema funciona con cinco voltajes diferentes en la placa de circuito impreso:

- **12V:** suministrados por la batería, de donde surgen los voltajes restantes del sistema. La batería también suministra corriente a los grandes consumidores de energía a través de fusibles, como son los motores agitadores encargados de la remoción de cenizas y el movimiento del combustible sólido dentro del reactor, a la vez que alimenta al transistor que regula al ventilador.
- **24V:** generado por un convertidor integrado (XL6009) capaz de suministrar hasta 1A, este voltaje alimenta los transceptores de 4-20mA. Cada dispositivo está equipado con un termistor PolyFuse (fusible reinicialable basado en PTC) para evitar problemas en la unidad de control en caso de un cortocircuito externo, abriendo el circuito hasta que se resuelva el problema.
- **5, 3 y 1.5V:** estos voltajes son proporcionados por reguladores lineales de baja caída de voltaje AMS1117-XX y se utilizan para alimentar varios circuitos integrados dentro del sistema.

5.5 Firmware y software

En esta sección se describe el software y el firmware que componen el sistema de control, incluida la gestión de tareas, la interacción con la interfaz web y la programación flexible para la automatización de procesos y la monitorización en tiempo real.

5.5.1 Firmware

Para brindar robustez ante fallas durante la operación y permitir la paralelización de diferentes tareas a realizar por la unidad de control, se implementó el sistema operativo FreeRTOS. Los RTOS permiten al programador definir tareas y establecer prioridades de ejecución, asegurando con ello que el sistema funcione según lo planeado. Para evitar la pérdida de datos, estos se almacenan localmente en una tarjeta microSD, que también admite acceso remoto.

Si de repente se pierde el acceso al control del sistema, la monitorización continuará sin corromper los datos siempre y cuando no se corte la energía o el usuario lo detenga; por lo que al apagar el sistema y retirar la tarjeta microSD se podría acceder a la información proporcionada por los diferentes sensores, o esperar de nuevo a la reconexión con el sistema para poder localizar y corregir fallos.

El proceso de adquisición de datos y control del sistema está compuesto por siete tareas principales, las cuales se ilustran en el diagrama de flujo simplificado de la Figura 5. 8. Estas tareas incluyen la comunicación TCP/IP por Wi-Fi, la

actualización de firmware, el procesador de solicitudes del servidor web, el envío y recepción de datos vía WebSocket, la captura de datos de los sensores, el intérprete de modo automático y el lazo de control de potencia PID.

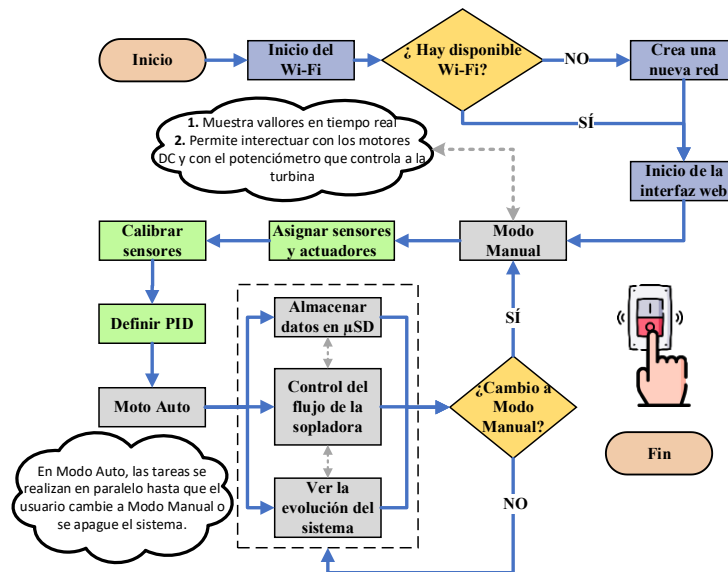


Figura 5. 8 Diagrama de flujo esquemático del funcionamiento del firmware.

Al iniciar el sistema, todas las tareas se inicializan y almacenan en memoria estática, permaneciendo en estado de espera hasta que un evento permita continuar. En primer lugar, el sistema intenta establecer una conexión inalámbrica con una red Wi-Fi conocida. Si no se logra la conexión después de varios intentos, el sistema crea una nueva red (modo punto de acceso) de manera que el usuario pueda acceder a la interfaz de control y monitorización proporcionada por el servidor web interno. Las páginas del servidor web se almacenan en la memoria interna del microcontrolador por lo que, si se extrae o daña la tarjeta SD, el servidor seguirá funcionando. Además, el servidor web permite la revisión y configuración de los valores de calibración de los sensores.

Por defecto, el sistema inicia en *modo manual*, lo que permite al usuario controlar los motores y el flujo de aire de entrada a través de una *interfaz de usuario web remota*. Este control manual permite el encendido y la iniciación del reactor. El usuario también puede controlar la cadencia de adquisición de datos. Una vez iniciado el proceso de gasificación dentro del reactor, el sistema puede cambiarse a *modo automático*. En este modo, la unidad de control se encarga de mantener la temperatura deseada ajustando el flujo de aire de entrada para regular la combustión.

5.5.2 Software

La unidad de control utiliza un lenguaje de programación que permite a los usuarios definir los intervalos de tiempo de funcionamiento de cada motor. El comportamiento del sistema se configura mediante un lenguaje basado en instrucciones secuenciales, similar a BASIC. Los usuarios pueden iniciar, detener o modificar un programa de forma interactiva y remota a través de una *interfaz de línea de comandos*. Este enfoque personalizable ofrece una gran flexibilidad del sistema, lo que permite la automatización futura de procesos como el arranque del sistema o el control del generador mediante la incorporación de las instrucciones necesarias.

De forma predeterminada, el sistema funciona en *modo automático*, sin necesidad de interacción del usuario. En caso de pérdida de comunicación, el sistema continúa funcionando de forma independiente. La interfaz gráfica de usuario proporciona visualización en tiempo real de las tendencias de las variables, ajuste de la temperatura objetivo, calibración de los sensores, actualizaciones OTA y recuperación remota de datos de la tarjeta de memoria. En el *modo manual*, los usuarios también pueden ajustar la potencia del ventilador según lo deseen.

Debido a la alta inercia térmica del sistema, no es necesaria la interacción constante con el control de flujo del ventilador. Para ahorrar recursos, las mediciones se pueden registrar cada 30 segundos. Sin embargo, para obtener curvas de monitoreo más precisas, las mediciones se han actualizado cada segundo.

5.6 Resultados y discusión

Para validar la funcionalidad del sistema y su capacidad de respuesta a las demandas de los usuarios, se realizaron dos pruebas de campo. El objetivo de ambas pruebas fue investigar el comportamiento de la temperatura dentro del gasificador, así como la capacidad del sistema de control automatizado para mantener la temperatura objetivo. El sistema se cargó a su capacidad máxima con 26.62 kg de pellets de orujillo y luego se puso en marcha desde condiciones ambientales (aproximadamente 25 °C).

La primera prueba tuvo como objetivo evaluar la respuesta del sistema a los cambios en las condiciones de trabajo predefinidas. Según la literatura científica [100], el caudal de aire y el tipo de biomasa son los factores más importantes que afectan a la temperatura en los gasificadores de biomasa. El control de la temperatura es relativamente sencillo y depende directamente de la cantidad de aire suministrado [99]. Inicialmente, se estableció un punto de ajuste de temperatura de 600 °C. Después de que el sistema se estabilizó a esta temperatura, el punto de ajuste se elevó a 800 °C. La transición a la temperatura

más alta tomó aproximadamente 10 minutos, tras los cuales el sistema mantuvo la estabilidad a la nueva temperatura.

La segunda prueba se centró en alcanzar los 800 °C, partiendo nuevamente de las condiciones ambientales. Esta temperatura se alinea con las condiciones de operación típicas para el control de temperatura en gasificadores de tiro descendente, como se documenta en la literatura científica [99], [100]. Una vez que se completaron ambas pruebas, se abrió el sistema para su limpieza y se pesó la materia prima carbonizada restante. En total, se consumieron 13.43 kg de materia prima de biomasa durante las pruebas. La configuración experimental utilizada para las pruebas de campo se muestra en la Figura 5. 9.



Figura 5. 9 Imágenes del reactor prototipo, incluida una vista de cerca de la unidad de control.

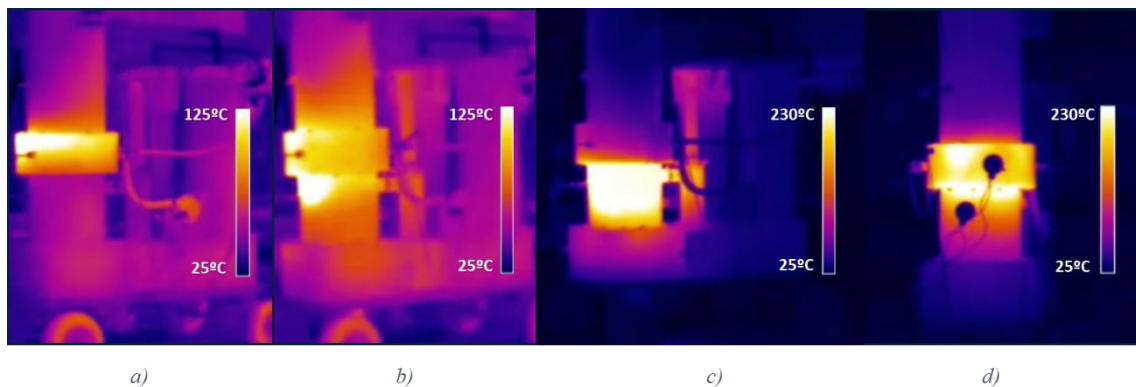


Figura 5. 10 **a)** Zona de combustión durante el arranque. **b)** Distribución de temperatura en el reactor 30 minutos después del arranque. **c)** Distribución de temperatura en el reactor alrededor de una hora después del arranque. **d)** Distribución de temperatura en el reactor durante la operación en estado estable que muestra la ubicación de los termopares.

Durante la primera prueba, se utilizó una cámara termográfica (SATIR D600, Irlanda) para supervisar el rendimiento del sistema durante la fase transitoria. La Figura 5. 10 muestra cuatro imágenes térmicas capturadas a

diferentes intervalos, que ilustran la distribución de la temperatura a lo largo de la superficie externa del reactor. El proceso comenzó con la generación de calor en la zona de combustión, que luego se propagó a las zonas adyacentes de pirólisis y gasificación. La temperatura de la superficie alcanzó un máximo de 125 °C durante el suministro de calor externo mediante una antorcha y se estabilizó alrededor de 230 °C durante la operación en estado estacionario. El gradiente de temperatura significativo observado entre el interior (800 °C) y el exterior (230 °C) del reactor de gasificación refleja la alta eficiencia de aislamiento del sistema.

5.6.1 Rendimiento del sistema durante la primera prueba

La puesta en marcha inicial se llevó a cabo el 27 de mayo de 2024 para evaluar si el sistema de control podía mantener una temperatura estable en la zona central del reactor. Durante esta prueba, la temperatura se fijó inicialmente en aproximadamente 600 °C, con una tolerancia de ± 25 °C, antes de elevarse a la temperatura objetivo final de 800 °C. El comportamiento observado en esta prueba se ilustra en la Figura 5. 11 a), donde se observan variaciones significativas en las lecturas de temperatura en diferentes zonas del reactor junto con los caudales de aire de entrada y gas producto a la salida. En concreto, las temperaturas en las zonas inferior, media y superior variaron considerablemente, teniendo en cuenta que estos sensores están a tan solo 30 cm de distancia entre sí. Esta variación puede atribuirse a los gradientes térmicos naturales que se producen en los reactores de gasificación de biomasa, donde la zona de combustión suele ser mucho más caliente que las zonas de reducción y pirólisis. La distribución de la temperatura a través del reactor está influenciada por la composición y el movimiento descendente del combustible, la tasa de flujo de aire y los procesos de transferencia de calor. La temperatura de salida del gas producto se mantuvo estable en aproximadamente 40 °C debido al funcionamiento eficaz del intercambiador de calor, lo que garantiza su idoneidad para su uso en motores de combustión interna[134].

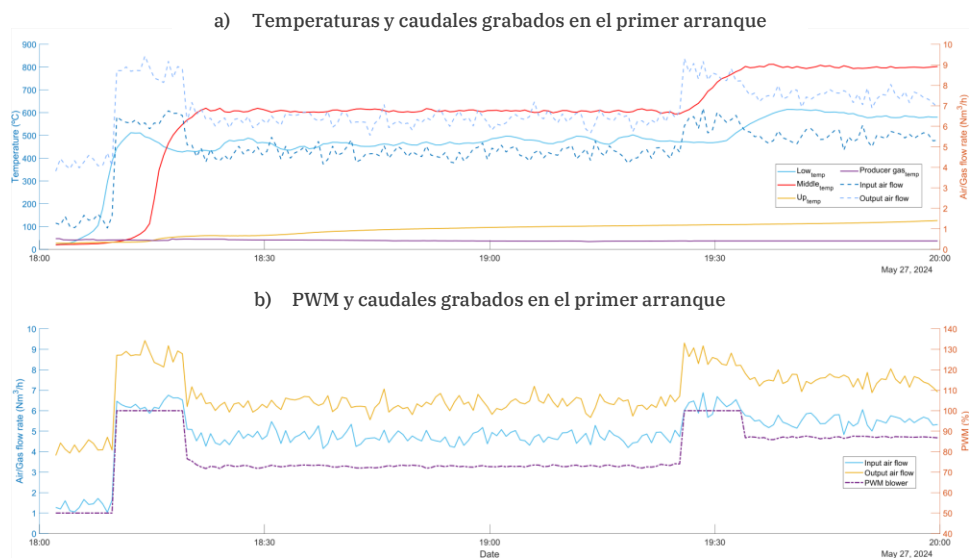


Figura 5. 11 Temperaturas del aire y gas producto, junto con el PWM registrado durante el primer arranque.

La medición de flujo exhibe un ruido significativo debido a la naturaleza inherente del sistema de detección de flujo, que está sujeto a pequeñas fluctuaciones de presión constantes. Estas variaciones surgen de la variación de la posición de las palas del ventilador, que puede haber pasado recientemente o estar empujando aire activamente en cada punto de medición. La Figura 5. 11 b) ilustra el comportamiento de la señal de control, que regula la potencia suministrada al ventilador, en comparación con los caudales instantáneos medidos con medidores de flujo.

En la Figura 5. 11 a), se puede observar que después de siete minutos y medio, se alcanzó una temperatura de alrededor de 400 °C en la zona de reducción en la sección inferior del reactor, momento en el que se pudo activar el modo automático. En el modo automático, el sistema primero tiene como objetivo alcanzar la temperatura elegida aumentando la entrada de aire para promover la combustión, como refleja el elevado caudal de aire inicial, observable en la Figura 5. 11 a) y b). Una vez que se alcanza la temperatura objetivo, el sistema regula el flujo de aire entrante para mantener la temperatura de ajuste hasta la desactivación, el apagado o el establecimiento de una nueva temperatura de funcionamiento. Como se ha evidenciado, la estrategia de control, basada en PWM, permite un ajuste preciso de la potencia del ventilador, lo que permite un control preciso de la temperatura del reactor. Cualquier desviación de temperatura se aborda rápidamente a través de este mecanismo de retroalimentación, que ajusta el funcionamiento del ventilador. La rápida respuesta del sistema garantiza que la temperatura deseada se alcance en cuestión de minutos, manteniendo la estabilidad y la eficiencia del proceso de gasificación.

5.6.2 Rendimiento del sistema durante la segunda fase de arranque

La segunda puesta en marcha tenía como objetivo replicar una condición de funcionamiento más realista apuntando directamente a una temperatura de 800 $\pm$ 25 °C en la zona de combustión. El modo automático se activó después de una fase de inicio de 8 minutos. El sistema alcanzó la temperatura objetivo en 16 minutos y la estabilizó en aproximadamente 3 minutos adicionales, manteniendo una temperatura uniforme durante toda la prueba de dos horas. El comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso se presenta en la Figura 5. 12 a), mostrando las temperaturas en las zonas inferior, media y superior del reactor, junto con la temperatura del gas producto a la salida del reactor. El caudal de aire introducido por el ventilador y el caudal de gas producto a la salida también se muestran en la Figura 5. 12 b).

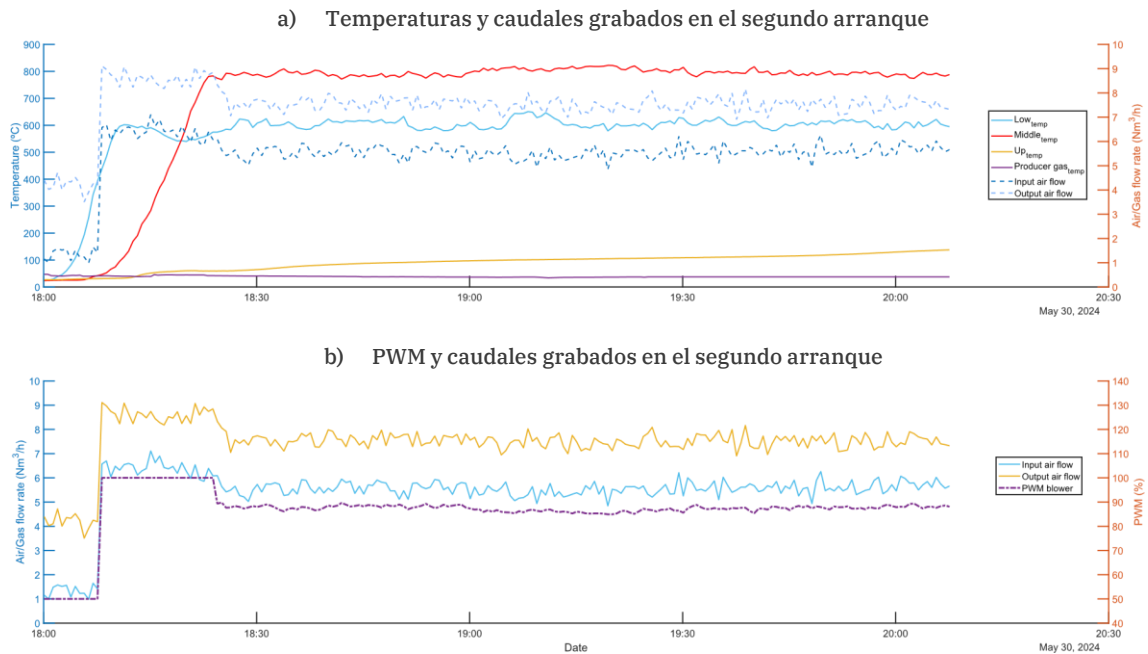


Figura 5. 12 Temperaturas del aire y gas producto, junto con el PWM registrado durante el segundo arranque.

La Figura 5. 12 b) revela cierta inestabilidad en las mediciones del flujo de aire causada por pequeñas fluctuaciones de presión inherentes al funcionamiento del ventilador, similar a lo mostrado en la primera prueba, que no afectaron significativamente el rendimiento del sistema. A pesar de esta ligera inestabilidad inducida por el ventilador, el análisis de la señal de control en la Figura 5. 12 b) indica una variación mínima entre las temperaturas de entrada y salida, al igual que en los caudales, lo que demuestra un rendimiento general del sistema estable y confiable.

5.7 Conclusiones y perspectivas futuras

La gasificación demuestra un potencial interesante para el aprovechamiento de residuos agrícolas. Como se demuestra en este estudio, los sistemas de monitorización y control automatizado facilitan el uso de esta tecnología y pueden apoyar la electrificación en zonas fuera de la red, como regiones remotas o aisladas (incluidas las zonas rurales), debido a su bajo coste, facilidad de manejo y mantenimiento, además de su adaptabilidad a diversas fuentes de biomasa. Además, la optimización de los parámetros operativos mejora la eficiencia del proceso, maximizando la conversión de energía y reduciendo las emisiones. Estos avances fortalecen su viabilidad como alternativa sostenible, con aplicaciones tanto en la generación distribuida como en la integración de microrredes.

El sistema de control basado en el ESP32 con FreeRTOS no solo gestiona de forma eficiente el proceso de gasificación, sino que también posee capacidad computacional más allá de las necesidades inmediatas. Esto significa que mientras el sistema espera eventos clave, su procesador tiene amplios recursos para manejar tareas adicionales sin comprometer el rendimiento. Gracias a estas

características, es posible integrar sensores adicionales (como dos sensores de 4-20 mA), ampliar la comunicación con dispositivos I²C e incluso coordinar dos gasificadores simultáneamente mediante conectividad inalámbrica o el protocolo Modbus, muy utilizado en la industria. Más allá de la optimización de la gestión energética, esta capacidad también permite la implementación de un sistema redundante en paralelo, asegurando un funcionamiento continuo en caso de fallos o mantenimiento. Todo ello se puede conseguir sin grandes modificaciones en el diseño actual, lo que refuerza la flexibilidad y escalabilidad de la solución. Por último, el acceso remoto a través de una interfaz móvil intuitiva no solo simplifica la operación del sistema, sino que también cierra la brecha entre la tecnología y sus usuarios.

A pesar de que el sistema actual representa un avance significativo en la gasificación portátil de biomasa, existen varias oportunidades para el desarrollo futuro. Un área clave de mejora es la integración de técnicas de optimización modernas, como el control predictivo de modelos o la optimización de enjambres de partículas, que podrían mejorar el rendimiento del sistema mediante el ajuste dinámico de parámetros como el caudal de aire y los puntos de ajuste de temperatura. La implementación de dicha estrategia de optimización podría mejorar aún más la eficiencia del sistema, la adaptabilidad a diferentes tipos de biomasa y la estabilidad general en diferentes condiciones operativas.

Los estudios futuros podrían centrarse en explorar el uso de diferentes tipos de biomasa para evaluar su impacto en el rendimiento del sistema. Además, se podrían realizar esfuerzos para mejorar el proceso de puesta en marcha, haciéndolo totalmente automatizado, así como para desarrollar un sistema automático de alimentación de biomasa. Además, explorar el uso y el control del grupo motor-generador a través del mismo tablero de control simplificaría la arquitectura del sistema. Otra dirección prometedora para la mejora consiste en ampliar las capacidades del sistema mediante la integración de sensores adicionales, optimizar los protocolos de comunicación para implementaciones a gran escala y mejorar aún más la experiencia del usuario a través de interfaces de control aún más intuitivas. Estos avances facilitarían la adopción más amplia de sistemas de gasificación de biomasa para la producción de energía sostenible en regiones remotas y fuera de la red.

Capítulo 6

Discusión de resultados, conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones generales

El presente trabajo de tesis constituye una aportación a la optimización de procesos de revalorización energética de residuos, especialmente en sectores como el agrícola y agroforestal. Alineado con los principios de la *economía circular* recogido en las 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar), se ha diseñado y validado un par de propuestas tecnológicas que no solo promueven la sostenibilidad ambiental, sino que también resultan accesibles desde el punto de vista económico y técnico, gracias a un enfoque que busca la eficiencia, un diseño compacto y orientado al usuario final.

La sensorización, en este contexto, ha sido concebida como un medio para mejorar el conocimiento del comportamiento de los sistemas propuestos, monitorizando en tiempo real mediante el desarrollo de redes de sensores, al mismo tiempo que facilita la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia energética. Se ha priorizado el desarrollo de soluciones de bajo coste, bajo consumo energético y fácil mantenimiento, con el fin de favorecer su implementación en entornos reales bajo la filosofía DIY (Do It Yourself), reduciendo así las barreras de entrada a tecnologías habitualmente reservadas a entornos industriales complejos.

En términos específicos:

- En el [capítulo 1](#), se identificaron las necesidades del sector oleícola, especialmente en relación con el aprovechamiento energético del alperujo. Se evidenció que las tecnologías existentes son poco accesibles para pequeñas explotaciones, dado su alto coste, complejidad técnica y poca adaptabilidad al tipo de residuo.
- En el [capítulo 2](#), se llevó a cabo una revisión del estado de la técnica en relación con el sector del olivar, las tecnologías de secado solar, las simulaciones mediante técnicas de inteligencia artificial y dinámica de fluidos computacional, así como distintos tipos de gasificadores, sentando las bases teóricas del trabajo desarrollado.
- En el [capítulo 3](#), se presentó un secadero solar indirecto de bajo coste, capaz de reducir significativamente el contenido de humedad del orujo de aceituna (de un 67.17% a un 39.90% en un periodo de 10 días) sin necesidad de energía eléctrica externa, logrando una eficiencia de recuperación de la humedad en forma de agua del 78%. El sistema fue complementado con una interfaz de acceso remoto y almacenamiento

de datos, lo que facilitó su monitorización y aceptación por parte de los técnicos encargados de su manejo.

- En el [capítulo 4](#), se abordaron simulaciones que permitieron validar y mejorar el comportamiento del secadero solar. Se comprobó que la radiación solar y la temperatura ambiental son los factores más influyentes en el proceso, y se validó un modelo predictivo que mostró una alta concordancia con los datos reales. Se identificó que la velocidad óptima de secado se logra con una entrada de aire a 0.1 m/s.
- En el [capítulo 5](#), se diseñó y puso en marcha un gasificador de lecho fijo y flujo descendente, controlado por un sistema de monitorización propio. Las pruebas realizadas confirmaron su operatividad, alcanzando las temperaturas previstas y generando un gas limpio y utilizable. El sistema de filtrado y acondicionamiento funcionó adecuadamente, y los ensayos térmicos demostraron la eficacia del diseño en el control y concentración de la zona de gasificación, con temperaturas interiores superiores a los 800 °C.

En resumen, este trabajo ha demostrado que es posible aplicar tecnologías sencillas, sostenibles y de bajo coste para aprovechar energéticamente residuos en sectores donde normalmente no se utilizan soluciones tan avanzadas. Esto no solo abre nuevas oportunidades para modernizar estos entornos de forma accesible, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones que busquen mejorar el rendimiento de estos sistemas, integrarlos en redes distribuidas e incluso aplicar herramientas de inteligencia artificial para que funcionen de forma más eficiente y autónoma.

6.2 Trabajos futuros

El desarrollo presentado en esta Tesis Doctoral abre diversas vías de evolución y profundización, tanto a nivel tecnológico como metodológico. A continuación, se proponen varias líneas de investigación futuras que podrían enriquecer y consolidar los resultados obtenidos:

1. Optimización del diseño y eficiencia de los secaderos solares.
 - a. [Profundizar en el estudio de materiales](#) que permitan mejorar la eficiencia térmica y reducir los costes, así como [optimizar la geometría del secadero](#) para reducir el tiempo de secado y facilitar la extracción de agua (por ejemplo, añadiendo un recubrimiento hidrofóbico en la superficie del cristal).
 - b. Estudiar la [incorporación de elementos activos](#) al prototipo, como los ejemplos que se indican a continuación:
 - i. Mecanismo agitador accionado por un motor: permitiría homogeneizar la muestra, evitando la acumulación de aceite en la capa superior el cual dificulta el proceso de secado.

- ii. Incorporación de calentadores solares en la zona inferior, ya sea mediante calefactores o serpentines rellenos de agua caliente: favorecería la circulación natural del aire dentro de la cámara.
 - iii. Incorporar unas aperturas en las zonas superior e inferior del prototipo que puedan ser controladas en tiempo real para mantener la temperatura en el interior, en función de la temperatura ambiental o el gradiente térmico deseado.
- c. **Integrar técnicas avanzadas de control automático** (por ejemplo, control predictivo basado en modelos o inteligencia artificial) para adaptar el proceso de secado en tiempo real a las condiciones ambientales variables.
- 2. Escalado y adaptación a diferentes tipos de residuos orgánicos.
 - a. **Evaluar el comportamiento del sistema con otros residuos agroindustriales** (por ejemplo, restos de poda, cáscaras), lo que permitiría extender su aplicabilidad a más sectores.
 - b. Investigar las **condiciones óptimas de secado y gasificación** para cada residuo y su impacto en el rendimiento energético en el proceso.
- 3. Mejora y automatización del proceso de gasificación.
 - a. Incorporar una **antorcha accionada de manera remota** que permita realizar el proceso de arranque de manera autónoma.
 - b. Trabajar un prototipo de alimentador de biomasa que permita **convertir el sistema en continuo**, frente al actual que se alimenta por lotes.
 - c. Realizar estudios de eficiencia energética global del sistema, analizando el balance energético con la incorporación de **analizador de gases y las posibilidades de cogeneración**.
- 4. Validación en entornos reales y desarrollo de prototipos comerciales.
 - a. **Implementar pilotos** en cooperativas, explotaciones agrícolas o instalaciones rurales para validar el comportamiento del sistema en condiciones reales.
 - b. Desarrollar prototipos más robustos y diseñados para su **producción en masa**, listos para su transferencia tecnológica, con el objetivo de impulsar la adopción comercial.
- 5. Evaluación ambiental y económica a largo plazo.
 - a. Realizar un **análisis de ciclo de vida** (ACV) y una **evaluación económica** detallada para determinar el impacto ambiental y los costes/beneficios reales del sistema a escala industrial.
 - b. Estudiar **incentivos regulatorios o modelos de negocio** sostenibles basados en la economía circular.

Capítulo 7 Referencias

Referencias

- [1] «Población Mundial: nan Billones de Personas (2025) - Worldometer». Accedido: 11 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldometers.info/es/poblacion-mundial/>
- [2] «World Energy Statistics and Balances - Data product», IEA. Accedido: 11 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- [3] «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [4] «International Hydropower Association». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hydropower.org/>
- [5] «Hoover Dam | Bureau of Reclamation». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/>
- [6] P. M. Fearnside, «Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry», *World Dev.*, vol. 77, pp. 48-65, ene. 2016, doi: 10.1016/j.worlddev.2015.08.015.
- [7] «World Energy Outlook 2023 – Analysis», IEA. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [8] I. CORPORATIVA, «Francisco Pizarro, el mayor proyecto fotovoltaico de Europa», Iberdrola. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica/planta-fotovoltaica-francisco-pizarro>
- [9] «Parque Eólico GECAMA», Grupo TYPSA. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tyrsa.com/proyectos/parque-eolico-gecama/>
- [10] «Energía eólica | Agencia Andaluza de la Energía». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-eolica>
- [11] A. Scala, M. Mureddu, A. Chessa, G. Caldarelli, y A. Damiano, «Distributed Generation and Resilience in Power Grids», en *Critical Information Infrastructures Security*, B. M. Hämmerli, N. Kalstad Svendsen, y J. Lopez, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 71-79. doi: 10.1007/978-3-642-41485-5_7.
- [12] D. P. Kaundinya, P. Balachandra, y N. H. Ravindranath, «Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 8, pp. 2041-2050, oct. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.02.002.
- [13] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, y F. Fahl, «Biogas: Developments and perspectives in Europe», *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 457-472, dic. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.

- [14] H. Lund, P. A. Østergaard, D. Connolly, y B. V. Mathiesen, «Smart energy and smart energy systems», *Energy*, vol. 137, pp. 556-565, oct. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.123.
- [15] «Economic Affairs & Promotion Unit - International Olive Council». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.internationaloliveoil.org/what-we-do/economic-affairs-promotion-unit/#figures>
- [16] «Principio de funcionamiento - Hiller separation & process». Accedido: 23 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hillerzentri.de/es/inicio/principio-de-funcionamiento.html>
- [17] S. Dermeche, M. Nadour, C. Larroche, F. Moulti-Mati, y P. Michaud, «Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies», *Process Biochem.*, vol. 48, n.º 10, pp. 1532-1552, oct. 2013, doi: 10.1016/j.procbio.2013.07.010.
- [18] «Global Hydrogen Review 2021 – Analysis», IEA. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- [19] P. Stegmann, M. Londo, y M. Junginger, «The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters», *Resour. Conserv. Recycl. X*, vol. 6, p. 100029, may 2020, doi: 10.1016/j.rcrx.2019.100029.
- [20] A. Moharamian, S. Soltani, M. A. Rosen, S. M. S. Mahmoudi, y T. Morosuk, «A comparative thermoeconomic evaluation of three biomass and biomass-natural gas fired combined cycles using organic Rankine cycles», *J. Clean. Prod.*, vol. 161, pp. 524-544, sep. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.174.
- [21] A. Gómez-Barea y B. Leckner, «Modeling of biomass gasification in fluidized bed», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, n.º 4, pp. 444-509, ago. 2010, doi: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.
- [22] T. Allohverdi, A. K. Mohanty, P. Roy, y M. Misra, «A Review on Current Status of Biochar Uses in Agriculture», *Molecules*, vol. 26, n.º 18, Art. n.º 18, ene. 2021, doi: 10.3390/molecules26185584.
- [23] BBVA, «Descubre cuáles son los distintos colores del hidrógeno | BBVA», BBVA NOTICIAS. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/descubre-cuales-son-los-distintos-colores-del-hidrogeno/>
- [24] META_AUTORES_CREADORES_DEL_SITIO, «META_NOMBRE_DEL_PROYECTO_70». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.moeve.es/es/utilidades/catalogo/hidrogeno-verde/valle-andaluz>
- [25] «Global Hydrogen Review Summary Progress – Global Hydrogen Review 2024 – Analysis», IEA. Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/global-hydrogen-review-summary-progress>

- [26] A. Lama-Muñoz, F. Rubio-Senent, A. Bermúdez-Oria, J. Fernández-Bolaños, Á. F. Prior, y G. Rodríguez-Gutiérrez, «The use of industrial thermal techniques to improve the bioactive compounds extraction and the olive oil solid waste utilization», *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 55, pp. 11-17, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.009>.
- [27] J. Alburquerque José Antonio González José, Tortosa German, Baddi Ghita Ait, Cegarra, «Evaluation of “alperujo” composting based on organic matter degradation, humification and compost quality», *Biodegradation*, vol. 20, n.º 4, pp. 257-270, 2009, doi: [10.1007/s10532-008-9218-y](https://doi.org/10.1007/s10532-008-9218-y).
- [28] S. L. Fabiana, C. A. Antonia, G. M. Teresa, y C. L. Noemí, «Method for phenol recovery from “alperujo”: numerical optimization and predictive model», *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 245, pp. 1641-1650, 2019, doi: [10.1007/s00217-019-03269-1](https://doi.org/10.1007/s00217-019-03269-1).
- [29] A. G. Pantziaros, X. A. Trachili, A. D. Zentelis, V. Sygouni, y C. A. Paraskeva, «A new olive oil production scheme with almost zero wastes», *Biomass Conv Bioref*, vol. 11, pp. 547-557, 2021, doi: [10.1007/s13399-020-00625-0](https://doi.org/10.1007/s13399-020-00625-0).
- [30] I. Montero, M. T. Miranda, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, C. V. Rojas, y S. Nogales, «Solar Dryer Application for Olive Oil Mill Wastes», *Energies*, vol. 8, n.º 12, pp. 14049-14063, 2015, doi: [10.3390/en81212415](https://doi.org/10.3390/en81212415).
- [31] R. Arjona, A. García, y P. Ollero, «The drying of alpeorujo, a waste product of the olive oil mill industry», *J Food Eng*, vol. 41, n.º 3, pp. 229-234, 1999, doi: [10.1016/S0260-8774\(99\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00104-1).
- [32] F. J. G. la Cruz, P. J. Casanova-Peláez, J. M. Palomar-Carnicero, y F. Cruz-Peragón, «Characterization and analysis of the drying real process in an industrial olive-oil mill waste rotary dryer: A case of study in Andalusia», *Appl Therm Eng*, vol. 116, pp. 1-10, 2017, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2017.01.050](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.050).
- [33] A. G. Ulaş Baysan Mehmet Koç y F. K. Ertekin, «Investigation of drying conditions to valorize 2-phase olive pomace in further processing», *Dry. Technol.*, vol. 40, n.º 1, pp. 65-76, 2022, doi: [10.1080/07373937.2020.1770279](https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1770279).
- [34] R. Aguado, D. Vera, F. Jurado, y G. Beltrán, «An integrated gasification plant for electric power generation from wet biomass: toward a sustainable production in the olive oil industry», *Biomass Conv Bioref*, 2022, doi: [10.1007/s13399-021-02231-0](https://doi.org/10.1007/s13399-021-02231-0).
- [35] F. J. G. la Cruz, J. M. Palomar-Carnicero, Q. Hernández-Escobedo, y F. Cruz-Peragón, «Determination of the drying rate and effective diffusivity coefficients during convective drying of two-phase olive mill waste at rotary dryers drying conditions for their application», *Renew Energy*, vol. 153, pp. 900-910, 2020, doi: [10.1016/j.renene.2020.02.062](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.062).
- [36] F. R. R. Fernando Castaño y M. G. Ortega, «Modeling of a Cocurrent Rotary Dryer», *Dry. Technol.*, vol. 30, n.º 8, pp. 839-849, 2012, doi: [10.1080/07373937.2012.668998](https://doi.org/10.1080/07373937.2012.668998).

- [37] Agencia Andaluza de la Energía (AAE), «La bioenergía en Andalucía». Consejería de Hacienda Industria y Energía, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documents/3_2_0068_20_LA_BIOENERGIA_EN_ANDALUCIA.PDF
- [38] A. Sharma, C. R. Chen, y N. V. Lan, «Solar-energy drying systems: A review», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 13, n.º 6, pp. 1185-1210, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.015.
- [39] P. Kumar y D. Singh, «Advanced technologies and performance investigations of solar dryers: A review», *Renew Energy Focus*, vol. 35, pp. 148-158, 2020, doi: 10.1016/j.ref.2020.10.003.
- [40] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed. CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b17208.
- [41] A. Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, y N. A. Rahim, «Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review», *Sol. Energy*, vol. 221, pp. 559-582, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.056.
- [42] O. V. Ekechukwu, «Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory», *Energy Convers Manag*, vol. 40, n.º 6, pp. 593-613, 1999, doi: 10.1016/S0196-8904(98)00092-2.
- [43] O. V. Ekechukwu y B. Norton, «Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications», *Energy Convers Manag*, vol. 40, n.º 6, pp. 657-667, 1999, doi: 10.1016/S0196-8904(98)00094-6.
- [44] O. V. Ekechukwu y B. Norton, «Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology», *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, n.º 6, pp. 615-655, abr. 1999, doi: 10.1016/S0196-8904(98)00093-4.
- [45] V. K. Sharma, A. Colangelo, y G. Spagna, «Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying», *Renew Energy*, vol. 6, n.º 4, pp. 413-424, 1995, doi: 10.1016/0960-1481(94)00075-H.
- [46] A. A. M. Sayigh, «Renewables: The Energy for the 21st Century», en *World Renewable Energy Congress VI*, 2000, p. 634.
- [47] M. C. Téllez, I. P. Figueroa, B. C. Téllez, E. C. L. Vidaña, y A. L. Ortiz, «Solar drying of Stevia (Rebaudiana Bertoni) leaves using direct and indirect technologies», *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 898-907, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.031.
- [48] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyan, y R. Goic, «A review of solar drying technologies», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 16, n.º 5, pp. 2652-2670, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.007.
- [49] M. Moheno-Barrueta *et al.*, «Experimental Evaluation and Theoretical Optimization of an Indirect Solar Dryer with Forced Ventilation under Tropical Climate by an Inverse Artificial Neural Network», *Appl Sci*, vol. 11, n.º 16, 2021, doi: 10.3390/app11167616.
- [50] S. ben Mabrouk y A. Belghith, «Development of the solar crop dryers in Tunisia», en *World Renewable Energy Congress VI*, 2000, pp. 2206-2211.

- [51] A. Fudholi, K. Sopian, M. A. Alghoul, M. H. Ruslan, y M. Y. Othman, «Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds», *Renew Energy*, vol. 78, pp. 561-565, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.01.050.
- [52] S. Shamekhi-Amiri, T. B. Gorji, M. Gorji-Bandpy, y M. Jahanshahi, «Drying behaviour of lemon balm leaves in an indirect double-pass packed bed forced convection solar dryer system», *Case Stud Therm Eng*, vol. 12, pp. 677-686, 2018, doi: 10.1016/j.csite.2018.08.007.
- [53] C. I. Nindo, Y. Kudo, y E. Bekki, «Test Model for Studying Sun Drying of Rough Rice Using Far-Infrared Radiation», *Dry Technol*, vol. 13, n.º 1-2, pp. 225-238, 1995, doi: 10.1080/07373939508916951.
- [54] A. A. Zomorodian y M. Dadashzadeh, «Indirect and Mixed Mode Solar Drying Mathematical Models for Sultana Grape», *J Agr Sci Tech*, vol. 11, n.º 4, pp. 391-400, 2009, doi: 10.1080/07373939508916951.
- [55] E. Baniasadi, S. Ranjbar, y O. Boostanipour, «Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage», *Renew Energy*, vol. 112, pp. 143-150, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.043>.
- [56] T. A. Yassen y H. H. Al-Kayiem, «Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer», *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 284-293, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.05.011.
- [57] A.-J. Perea-Moreno, A. Juaidi, y F. Manzano-Agugliaro, «Solar greenhouse dryer system for wood chips improvement as biofuel», *J Clean Prod*, vol. 135, pp. 1233-1241, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.036.
- [58] I. Montero, J. Blanco, T. Miranda, S. Rojas, y A. R. Celma, «Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products», *Energy Convers Manage*, vol. 51, n.º 7, pp. 1510-1521, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.02.009.
- [59] S. Dabiri, E. Khodabandeh, A. K. Poorfar, R. Mashayekhi, D. Toghraie, y S. A. A. Zade, «Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator», *Energy*, vol. 153, pp. 17-26, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.025>.
- [60] M. H. Esfe y D. Toghraie, «Numerical study on the effect of solar radiation intensity on the fresh water productivity of solar still equipped with Thermoelectric Cooling System (TEC) for hot and dry areas of Semnan», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 32, p. 101848, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101848>.
- [61] T. B. Lopez-Garcia, A. Coronado-Mendoza, y J. A. Domínguez-Navarro, «Artificial neural networks in microgrids: A review», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 95, p. 103894, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103894>.
- [62] M. T. Khadir, *Modeling and Predictive Control*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2021. doi: doi:10.1515/9783110646054.

- [63] M. N. Rajesh, A. J. Mohd, O. Suhaili, H. M. A, H. Haslaniza, y R. N. Abd, «Application of Artificial Intelligence in Food Industry—a Guideline», *Food Eng. Rev.*, vol. 14, pp. 134-175, 2022, doi: 10.1007/s12393-021-09290-z.
- [64] S. Meziane, «Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer», *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n.º 3, pp. 1644-1649, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.027>.
- [65] M. Abderrahman, R. Walid, B. Abdelaziz, y O. Abdelkader, «Experimental investigations on drying kinetics and modeling of two-phase olive pomace dried in a hybrid solar greenhouse dryer», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, pp. 5471-5483, 2023, doi: 10.1007/s10973-023-12063-x.
- [66] V.-C. David, «Generación eléctrica distribuida y aprovechamiento de los residuos de la industria del olivar», Tesis doctoral, Universidad de Jaén, 2013.
- [67] A. Benhamza, A. Boubekri, A. Atia, T. Hadibi, y M. Arıcı, «Drying uniformity analysis of an indirect solar dryer based on computational fluid dynamics and image processing», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, p. 101466, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101466>.
- [68] F. J. José Cabrera-Escobar David Vera y R. Cabrera-Escobar, «CFD investigation of the behavior of a solar dryer for the dehydration of olive pomace», *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.*, vol. 46, n.º 1, pp. 902-917, 2024, doi: 10.1080/15567036.2023.2292242.
- [69] D. Toghraie, A. Karami, M. Afrand, y A. Karimipour, «Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants», *Energy*, vol. 162, pp. 1052-1061, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.086>.
- [70] Q. Liu, M. F. Iqbal, J. Yang, X. Lu, P. Zhang, y M. Rauf, «Prediction of chloride diffusivity in concrete using artificial neural network: Modelling and performance evaluation», *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, p. 121082, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121082>.
- [71] S. Tian, N. I. Arshad, D. Toghraie, S. A. Eftekhari, y M. Hekmatifar, «Using perceptron feed-forward Artificial Neural Network (ANN) for predicting the thermal conductivity of graphene oxide-Al₂O₃/water-ethylene glycol hybrid nanofluid», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, p. 101055, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101055>.
- [72] M. Kaveh, R. A. Chayjan, I. Golpour, S. Poncet, F. Seirafi, y B. Khezri, «Evaluation of exergy performance and onion drying properties in a multi-stage semi-industrial continuous dryer: Artificial neural networks (ANNs) and ANFIS models», *Food Bioprod. Process.*, vol. 127, pp. 58-76, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.010>.
- [73] R. Aguado, D. Vera, D. A. López-García, J. P. Torreglosa, y F. Jurado, «Techno-economic assessment of a gasification plant for distributed cogeneration in the agrifood sector», *Appl Sci*, vol. 11, n.º 2, 2021, doi: 10.3390/app11020660.

- [74] R. Aguado, D. Sánchez-Lozano, A. Escámez, D. Vera, y F. Jurado Melguizo, «2 - Gasification for electrification of rural areas», en *Towards Future Smart Power Systems with High Penetration of Renewables*, M. Tostado-Véliz, A. Rezaee Jordehi, S. A. Mansouri, A. Ramos Galán, y F. J. Melguizo, Eds., Academic Press, 2025, pp. 23-52. doi: 10.1016/B978-0-443-29871-4.00002-6.
- [75] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory*. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/C2016-0-04056-1.
- [76] R. Raj, D. Kumar Singh, y J. V. Tirkey, «Co-gasification of Low-grade coal with Madhuca longifolia (Mahua) biomass and dual-fuelled mode engine performance: Effect of biomass blend and engine operating condition», *Energy Convers. Manag.*, vol. 269, p. 116150, oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116150.
- [77] D. Vera, F. Jurado, K. D. Panopoulos, y P. Grammelis, «Modelling of biomass gasifier and microturbine for the olive oil industry», *Int J Energy Res*, vol. 36, n.º 3, pp. 355-367, 2012, doi: 10.1002/er.1802.
- [78] D. Vera, F. Jurado, N. K. Margaritis, y P. Grammelis, «Experimental and economic study of a gasification plant fuelled with olive industry wastes», *Energy Sustain Dev*, vol. 23, pp. 247-257, 2014, doi: 10.1016/j.esd.2014.09.011.
- [79] R. Aguado, A. Escámez, F. Jurado, y D. Vera, «Experimental assessment of a pilot-scale gasification plant fueled with olive pomace pellets for combined power, heat and biochar production», *Fuel*, vol. 344, p. 128127, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128127.
- [80] C. Higman y M. V. der Burgt, «Gasification», *Gasification*, pp. 1-435, ene. 2008, doi: 10.1016/B978-0-7506-8528-3.X0001-6.
- [81] F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, y S. A. Sulaiman, «Trends of Syngas as a Fuel in Internal Combustion Engines», *Adv Mech Eng*, vol. 6, p. 401587, 2014, doi: 10.1155/2014/401587.
- [82] Kopiersperre, *Deutsch: Haupttypen von (Biomasse-)Vergasern*. 2014. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gasifier_types.svg
- [83] A. V. Bridgwater, «The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation», *Fuel*, vol. 74, n.º 5, pp. 631-653, may 1995, doi: 10.1016/0016-2361(95)00001-L.
- [84] P. R. Bhoi, R. L. Huhnke, A. Kumar, S. Thapa, y N. Indrawan, «Scale-up of a downdraft gasifier system for commercial scale mobile power generation», *Renew Energy*, vol. 118, pp. 25-33, abr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.002.
- [85] A. Kushwah, T. R. Reina, y M. Short, «Modelling approaches for biomass gasifiers: A comprehensive overview», *Sci Total Env.*, vol. 834, p. 155243, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.

- [86] M. Asadullah, «Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 29, pp. 201-215, ene. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.074.
- [87] P. Sharma, B. Gupta, M. Pandey, K. Singh Bisen, y P. Baredar, «Downdraft biomass gasification: A review on concepts, designs analysis, modelling and recent advances», *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 5333-5341, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.789.
- [88] E. Shayan, V. Zare, y I. Mirzaee, «Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents», *Energy Convers Manag*, vol. 159, pp. 30-41, mar. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.096.
- [89] S. Heidenreich, M. Müller, y P. U. Foscolo, «Advanced Biomass Gasification: New Concepts for Efficiency Increase and Product Flexibility», *Adv. Biomass Gasif. New Concepts Effic. Increase Prod. Flex.*, pp. 1-134, jun. 2016, doi: 10.1016/C2015-0-01777-4.
- [90] D. Thimsen, R. E. Maurer, A. R. Pooler, D. Pui, B. Liu, y D. Kittelson, *Fixed-bed gasification research using US coals. Volume 14. Gasification of Kemmerer subbituminous coal*. Bureau of Mines United States Department of the Interior, 1985. doi: 10.2172/5868732.
- [91] M. Dogru, «Experimental results of olive pits gasification in a fixed bed downdraft gasifier system», *Int J Green Energy*, vol. 10, n.º 4, pp. 348-361, 2013, doi: 10.1080/15435075.2012.655351.
- [92] T. K. Patra y P. N. Sheth, «Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 50, pp. 583-593, oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.012.
- [93] A. Molino, S. Chianese, y D. Musmarra, «Biomass gasification technology: The state of the art overview», *J Energy Chem.*, vol. 25, n.º 1, pp. 10-25, ene. 2016, doi: 10.1016/j.jechem.2015.11.005.
- [94] D. Baruah y D. C. Baruah, «Modeling of biomass gasification: A review», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 39, pp. 806-815, nov. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.129.
- [95] S. K. Sansaniwal, K. Pal, M. A. Rosen, y S. K. Tyagi, «Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review», *Renew Sust Energ Rev*, vol. 72, pp. 363-384, may 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.038.
- [96] C. Sagüés, P. García-Bacaicoa, y S. Serrano, «Automatic control of biomass gasifiers using fuzzy inference systems», *Bioresour Technol*, vol. 98, n.º 4, pp. 845-855, 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.03.004.
- [97] A. S. Gandhi, T. Kannadasan, y R. Suresh, «Biomass downdraft gasifier controller using intelligent techniques», en *Gasification for Practical Applications*, Y. Yun, Ed., IntechOpen, 2012. doi: 10.5772/48564.
- [98] B. Gøbel, U. Henriksen, T. K. Jensen, B. Qvale, y N. Houbak, «The development of a computer model for a fixed bed gasifier and its use for

- optimization and control», *Bioresour Technol*, vol. 98, n.º 10, pp. 2043-2052, 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2006.08.019.
- [99] N. Striūgas, K. Zakarauskas, A. Džiugys, R. Navakas, y R. Paulauskas, «An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, n.º 1, pp. 1151-1159, dic. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.007.
- [100] P. V. Daniel y A. S. Gandhi, «Enhanced conventional PID controller for temperature control in woody gasifier using searching algorithms», *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng. IJITEE*, n.º 4, pp. 438-442, 2019.
- [101] Mathew Owen y Ralph Ripken, «Bioenergy for Sustainable Energy Access in Africa». 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.erm.com/contentassets/553cd40a6def42b196e32e4d70e149a1/bioenergy-for-sustainable-energy-access-in-africa---a-scoping-study-of-the-opportunities-and-challenges-of-bioenergy-replication-across-sub-saharan-africa-2018.pdf>
- [102] K. A. Shimpy Kumar Mahesh, «Performance Assessment and Modeling Techniques for Domestic Solar Dryers», *Food Eng. Rev.*, vol. 15, pp. 525-547, 2023, doi: 10.1007/s12393-023-09335-5.
- [103] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «POWER Data Access Viewer». [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>
- [104] A. Chavan y B. Thorat, «Techno-economic comparison of selected solar dryers: A case study», *Dry. Technol.*, vol. 40, n.º 10, pp. 2105-2115, 2022, doi: 10.1080/07373937.2021.1919141.
- [105] Q. Tu, Z. Ma, y H. Wang, «Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement», *Chem. Eng. J.*, vol. 452, p. 139200, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139200>.
- [106] E. Getahun, M. A. Delele, N. Gabbiye, S. W. Fanta, P. Demissie, y M. Vanierschot, «Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review», *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 88-110, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.049>.
- [107] P. D. Tegenaw, M. G. Gebrehiwot, y M. Vanierschot, «On the comparison between computational fluid dynamics (CFD) and lumped capacitance modeling for the simulation of transient heat transfer in solar dryers», *Sol. Energy*, vol. 184, pp. 417-425, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.024>.
- [108] J. Xamán y M. Gijón-Rivera, *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=ImKWDAEACAAJ>
- [109] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=RvBZ-UMpGzIC>

- [110] Y. A. Çengel, J. M. Cimbala, y M. Kanoğlu, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=7fdZyQEACAAJ>
- [111] S. Misha, A. L. Abdullah, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, y F. A. Sachit, «Simulation CFD and experimental investigation of PVT water system under natural Malaysian weather conditions», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 28-44, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.162>.
- [112] R. Amouiri y A. Belhamri, «CFD investigations on the behavior of a solar dryer used for medicinal herbs dehydration under climatic conditions of Constantine, Algeria», *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 2123-2130, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.475>.
- [113] S. Anand, D. P. Mishra, y S. K. Sarangi, «CFD supported performance analysis of an innovative biomass dryer», *Renew. Energy*, vol. 159, pp. 860-872, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.039>.
- [114] C. Martinez Bencardino, *Estadística básica aplicada*. Ecoe Ediciones, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/ujaen/titulos/125947>
- [115] H. Pereira, M. Meschiatti, R. Pires, y G. Blain, «On the performance of three indices of agreement: an easy-to-use r-code for calculating the Willmott indices», *Bragantia*, vol. 77, mar. 2018, doi: 10.1590/1678-4499.2017054.
- [116] S. Lundberg y S.-I. Lee, *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*. 2017. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>.
- [117] F. Hussain, M. Jaskulski, M. Piatkowski, y E. Tsotsas, «CFD simulation of agglomeration and coalescence in spray dryer», *Chem. Eng. Sci.*, vol. 247, p. 117064, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117064>.
- [118] S. Mondal, S. Dutta, P. Pande, y V. Naik-Nimbalkar, «Intensify staple fibre drying by optimizing air distribution in multistage convective dryer using CFD», *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 173, p. 108807, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108807>.
- [119] V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. S. Fennell, N. Shah, y E. J. Anthony, «Progress in biofuel production from gasification», *Prog Energy Combust Sci*, vol. 61, pp. 189-248, jul. 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2017.04.001.
- [120] M. L. V. Rios, A. M. González, E. E. S. Lora, y O. A. A. del Olmo, «Reduction of tar generated during biomass gasification: A review», *Biomass Bioenergy*, vol. 108, pp. 345-370, ene. 2018, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2017.12.002.
- [121] A. Escámez, R. Aguado, D. Sánchez-Lozano, F. Jurado, y D. Vera, «An ensemble multi-ANN approach for virtual oxygen sensing and air leakage prediction in biomass gasification plants», *Renew. Energy*, vol. 242, p. 122376, abr. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.122376.
- [122] C. Huang *et al.*, «Comprehensive investigations on the explosion suppression of biomass fuels: Starch as a representative», *Fuel*, vol. 315, p. 123276, may 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.123276.
- [123] G. Liang, H. Dai, H. Yin, Q. Zhao, y X. Chen, «Inhibition characteristics of coal dust explosion at the gasification atmosphere», *Adv. Powder Technol.*, vol. 32, n.º 10, 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.08.026.

- [124] S. Lin, Z. Liu, J. Qian, y X. Li, «Comparison on the explosivity of coal dust and of its explosion solid residues to assess the severity of re-explosion», *Fuel*, vol. 251, pp. 438-446, sep. 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.080.
- [125] D. Vera, F. Jurado, K. D. Panopoulos, y P. Grammelis, «Modelling of biomass gasifier and microturbine for the olive oil industry», *Int J Energy Res*, vol. 36, n.º 3, pp. 355-367, 2012, doi: 10.1002/er.1802.
- [126] A. Gagliano, F. Nocera, M. Bruno, y G. Cardillo, «Development of an equilibrium-based model of gasification of biomass by Aspen Plus», *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 1010-1019, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.264.
- [127] W. Salah, D. Ishak, y K. Hammadi, «PWM Switching Strategy for Torque Ripple Minimization in BLDC Motor», *J. Electr. Eng.*, vol. 62, n.º 3, pp. 141-146, jul. 2011, doi: 10.2478/v10187-011-0023-1.
- [128] M. C. Di Piazza y M. Pucci, «Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 270-280, jul. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.031.
- [129] P. P. Divyang y V. Mehta, «Design of high accurate universal intelligent temperature transmitter», *IJSTE-Int. J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 4, n.º 10, pp. 162-168, 2018.
- [130] T. Witt, R. Mena, y E. Cornell, «Single chip, 2-wire, 4–20 mA current loop RTD temperature transmitter design», *IECON Proc. Ind. Electron. Conf.*, pp. 2380-2383, feb. 2014, doi: 10.1109/IECON.2014.7048837.
- [131] R. Raj, J. V. Tirkey, P. Jena, y L. K. Prajapati, «Comparative analysis of Gasifier-CI engine performance and emissions characteristics using diesel with producer gas derived from coal– briquette-coconut shell-mahua feedstock and its blends», *Energy*, vol. 293, p. 130708, abr. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130708.
- [132] M. Tabaa, B. Chouri, S. Saadaoui, y K. Alami, «Industrial Communication based on Modbus and Node-RED», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 130, pp. 583-588, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.107.
- [133] P. Neumann, «Communication in industrial automation—What is going on?», *Control Eng. Pract.*, vol. 15, n.º 11, pp. 1332-1347, 2007, doi: 10.1016/j.conengprac.2006.10.004.
- [134] R. Aguado, A. Escámez, F. Jurado, y D. Vera, «Experimental assessment of a pilot-scale gasification plant fueled with olive pomace pellets for combined power, heat and biochar production», *Fuel*, vol. 344, p. 128127, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128127.