

Development of a Modular Dehydrator Utility Model with Thermal Storage and Biomass Backup: A Work-in-Progress Research for Food Sovereignty in the Andean Region

Abstract– This work-in-progress research presents the design and technological maturation of a modular food dehydrator optimized for high-altitude Andean environments, transitioning from TRL 4 to TRL 8. The system integrates a hybrid energy matrix consisting of solar photovoltaic, solar thermal, and biomass gasification, coupled with an advanced thermal energy storage unit (thermal battery). The study addresses the critical issue of post-harvest losses in rural communities like Nitiluisa, Chimborazo, where annual agricultural waste exceeds 30%. Through a comprehensive state-of-the-art review and technological surveillance of 139 verified scientific sources and international patents, the paper defines the thermodynamic, structural, and control requirements for 24/7 autonomous operation. Preliminary computational fluid dynamics (CFD) simulations validate internal temperature stability between 40-60°C and a potential CO2 emission reduction of 15% in the first year. The project also outlines a technological transfer strategy via a spin-off company to promote sustainable rural development and circular economy.

KEYWORDS-- HYBRID DEHYDRATION, THERMAL BATTERY, BIOMASS BACKUP, MODULAR DESIGN, ANDEAN AGRICULTURE, TRL 8.

DESARROLLO DE UN MODELO DE UTILIDAD DE DESHIDRATADOR MODULAR CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO Y RESPALDO DE BIOMASA: UNA INVESTIGACIÓN DE TRABAJO EN PROGRESO PARA LA SOBERANÍA ALIMENTARIA EN LA REGIÓN ANDINA

Resumen– Esta investigación de trabajo en progreso presenta el diseño y la maduración tecnológica de un deshidratador de alimentos modular optimizado para entornos andinos de gran altitud, transitando de un nivel TRL 4 a TRL 8. El sistema integra una matriz energética híbrida que consiste en energía solar fotovoltaica, solar térmica y gasificación de biomasa, acoplada a una unidad de almacenamiento de energía térmica avanzada (batería térmica). El estudio aborda el problema crítico de las pérdidas postcosecha en comunidades rurales como Nitiluisa, Chimborazo, donde el desperdicio agrícola anual supera el 30%. A través de una revisión exhaustiva del estado del arte y una vigilancia tecnológica de 139 fuentes científicas verificadas y patentes internacionales, el artículo define los requisitos termodinámicos, estructurales y de control para una operación autónoma las 24 horas del día. Las simulaciones preliminares de dinámica de fluidos computacional (CFD) validan la estabilidad de la temperatura interna entre 40-60°C y una reducción potencial de las emisiones de CO₂ del 15% en el primer año. El proyecto también describe una estrategia de transferencia tecnológica a través de una empresa derivada (spin-off) para promover el desarrollo rural sostenible y la economía circular.

Palabras clave– Deshidratación híbrida, batería térmica, respaldo de biomasa, diseño modular, agricultura andina, TRL 8.

I. INTRODUCCIÓN

La deshidratación de productos agrícolas constituye una de las técnicas de conservación más fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria y mitigar las pérdidas económicas en el sector agroindustrial [1,2]. En las regiones altoandinas del Ecuador, la fluctuación climática y la falta de infraestructura tecnológica adecuada provocan que aproximadamente el 30% de la producción de frutas y hortalizas se pierda antes de llegar al mercado, lo que representa una merma de hasta \$5,000 USD anuales por cada pequeño productor [2]. La comunidad de Nitiluisa, ubicada en la parroquia Calpi del cantón Riobamba, a una altitud de entre 3200 y 3300 msnm, se presenta como un estudio de caso crítico donde la agricultura tradicional se ve limitada por la

imposibilidad de procesar excedentes en épocas de sobreproducción.

El avance hacia sistemas de deshidratación más eficientes y sostenibles requiere la integración de fuentes de energía renovable que superen la intermitencia inherente a la radiación solar [3]. Si bien los deshidratadores solares convencionales son una alternativa de bajo costo, su incapacidad para operar durante la noche o en días nublados compromete la calidad organoléptica de los productos y aumenta el riesgo de contaminación microbiana [4]. La literatura científica reciente subraya que la hibridación con biomasa y el uso de sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) son componentes esenciales para lograr una operación continua y estable [5,6].

Esta investigación describe el desarrollo de un modelo de utilidad que evoluciona desde un prototipo base de nivel de madurez tecnológica TRL 4 hacia un sistema calificado TRL 8. La innovación radica en tres pilares fundamentales: modularidad estructural, integración de una "batería térmica" para almacenamiento de calor y un respaldo de energía basado en gasificación de biomasa local [7,8]. El enfoque de diseño centrado en el usuario rural plantea no solo la eficiencia técnica, sino también la sostenibilidad tecnológica, económica y social, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2, 7, 8 y 12 [9].

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA AVANZADA: ESTADO DEL ARTE EN SISTEMAS HÍBRIDOS

La revisión sistemática de la literatura científica entre los años 2020 y 2025 revela una transformación significativa en las tecnologías de secado solar [10]. La transición desde sistemas pasivos directos hacia configuraciones híbridas activas ha permitido mejorar las eficiencias de los colectores de un promedio del 20% a niveles superiores al 54% [11].

III. HIBRIDACIÓN SOLAR-BIOMASA Y CONTINUIDAD OPERATIVA

Los sistemas híbridos solar-biomasa se han consolidado como la solución más robusta para entornos rurales fuera de la red eléctrica [12]. Investigaciones lideradas por el Instituto de Energía y Recursos (TERI) han validado prototipos con capacidad de 50 kg por lote, integrando intercambiadores de calor basados en biomasa que permiten reducir el consumo eléctrico a niveles despreciables (menos de 0.5 unidades por 10 horas de operación) [13]. Esta configuración no solo asegura el secado nocturno, sino que aprovecha los residuos lignocelulósicos de la propia actividad agrícola, cerrando ciclos de economía circular [14].

En estudios experimentales realizados con cultivos de la familia Solanoideae (como tomate y pimiento), se ha observado que la adición de un quemador de biomasa estabiliza las temperaturas de la cámara, reduciendo los tiempos de secado en más del 70% en comparación con el secado al sol tradicional [15]. La tabla I resume los parámetros de eficiencia comparativos de diversas configuraciones tecnológicas identificadas en la literatura.

TABLA I.
 COMPARATIVA DE EFICIENCIA Y RENDIMIENTO EN
 SISTEMAS DE SECADO

Tecnología de Secado	Eficiencia Térmica (%)	Tiempo de Reducción de Humedad (h)	Estabilidad de Temperatura
Secado Solar Abierto	5 - 15	48 - 72	Muy Baja
Solar Indirecto Pasivo	20 - 30	24 - 48	Media
Híbrido Solar-Eléctrico	35 - 45	15 - 20	Alta
Híbrido Solar-Biomasa con TES	45 - 55	10 - 14	Muy Alta

Fuente: Adaptado de [6], [5], [17], [7].

IV. EL ROL DE LA BATERÍA TÉRMICA Y LOS MATERIALES DE ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de energía térmica (TES) es el núcleo de la autonomía energética del deshidratador modular propuesto [16]. Se han identificado dos mecanismos principales de almacenamiento: calor sensible y calor latente [8].

1. Almacenamiento de Calor Sensible: Materiales como el granito negro, la arena y la esteatita (soapstone) han demostrado ser eficaces para suministrar calor residual entre 3 y 16 horas después de la puesta del sol [12]. El uso de granito pintado de negro en configuraciones de torre aumentó el rendimiento de secado del 17% al 48% en un solo ciclo diario [17]. La investigación actual explora el uso de "baterías de arena" debido a su bajo costo y capacidad para operar tanto a bajas como a altas temperaturas (hasta 1,800°C en aplicaciones industriales) [8].

2. Almacenamiento de Calor Latente (PCM): Los materiales de cambio de fase, predominantemente la cera de parafina y los hidratos de sales, ofrecen una densidad de energía superior al absorber o liberar calor durante su transición de fase [18]. No obstante, su implementación requiere el uso de aletas conductoras o nanopartículas para superar su baja conductividad térmica intrínseca [19,20].

La termodinámica del almacenamiento térmico para aplicaciones de deshidratación se fundamenta en la capacidad de mantener el aire de secado entre 40°C y 60°C [21]. La energía calórica requerida (H_t) se define por la masa de agua a evaporar (W_w), el calor específico del aire (C_p) y el diferencial de temperatura (ΔT):

$$H_t = W_w C_p \Delta T \text{ [22]}$$

La integración de una batería térmica modular permite desacoplar la generación de energía del proceso de secado, permitiendo que el exceso de radiación solar recolectado durante el mediodía sea utilizado para compensar el enfriamiento nocturno sin necesidad de intervención manual [23,24].

V. AVANCES EN CONTROL INTELIGENTE E IOT

La incorporación de sistemas ciber-físicos ha transformado los deshidratadores en dispositivos inteligentes [25] capaces de optimizar el consumo energético en tiempo real [24]. La literatura reporta el uso de controladores lógicos programables (PLC) y microcontroladores (como Arduino o STM32) acoplados a sensores de temperatura y humedad relativa [26] que, mediante algoritmos de control difuso (fuzzy control), regulan el flujo de aire para evitar el endurecimiento de la superficie del producto (case hardening) [27]. Estos sistemas permiten un monitoreo remoto a través del Internet de las Cosas (IoT), facilitando que el productor agrícola reciba alertas sobre el estado del proceso en sus dispositivos móviles [28].

VI. VIGILANCIA TECNOLÓGICA Y ANÁLISIS DE PATENTES

La segunda actividad fundamental de este estudio consistió en un análisis exhaustivo del paisaje de propiedad intelectual. Se identificaron 15 patentes clave que definen el estado de la técnica en deshidratación modular y sistemas híbridos renovables [29].

VII. CLASIFICACIÓN Y TENDENCIAS EN PATENTES INTERNACIONALES

Las patentes registradas en las bases de datos de la WIPO, Espacenet y Google Patents muestran un interés creciente en la portabilidad y la eficiencia espectral [29].

TABLA II.
 PATENTES REVISADAS

Identificador de Patente	Clasificación IPC	Innovación Técnica	Aplicabilidad al Proyecto
WO2021144766A1	F26B, F24S	Deshidratador de domo solar portátil con	Diseño de focalización de radiación y

		trayectoria solar anual optimizada.	portabilidad [30].
WO2017027813A1	F26B 3/28	Secador solar modular colapsable para múltiples propósitos.	Criterios de diseño para transporte en zonas rurales de difícil acceso [31].
US11486639B2	A23L 3/40	Ensamblaje de bandejas con ventanas y infrarrojos y ventilación controlada.	Lógica de apilamiento modular y control de flujo de aire [32].
CN102889768A	F26B 23/00	Secador solar con intercambiador de calor de medio fluido circulante.	Optimización de la transferencia de calor en colectores de placa plana [33].
WO2009112719A3	E04B1/3444	Estructura modular de unidad habitable con partes plegables desde una unidad central.	Aplicable en zonas rurales, aisladas o de difícil acceso donde la construcción convencional es limitada [34].

Fuente: Adaptado de [30], [31], [32] [33] y [34].

El análisis de patentes revela un vacío tecnológico importante: no existen modelos de utilidad comerciales que integren simultáneamente un diseño modular escalable con una batería térmica independiente y un respaldo de biomasa automatizado. La mayoría de las invenciones se enfocan en la mejora de la eficiencia del colector solar o en la estructura mecánica del gabinete de secado, pero ignoran la resiliencia energética total requerida en comunidades rurales de altura como Nítiluisa, donde las heladas nocturnas y la nubosidad persistente son comunes.

VIII. JUSTIFICACIÓN DE LA NOVEDAD PARA EL SERVICIO NACIONAL DE DERECHOS INTELECTUALES (SENADI)

El modelo de utilidad propuesto por la ESPOCH se distingue por su arquitectura de "Batería Térmica Modular". A diferencia de los sistemas descritos en patentes previas (como la US5960560A que utiliza baterías eléctricas convencionales para lámparas de calor [35]), el diseño propuesto utiliza un módulo de almacenamiento térmico de alta capacidad térmica que se conecta al sistema de flujo de aire principal. Esta configuración permite que el deshidratador sea configurado dinámicamente según el tipo de cosecha, agregando o removiendo módulos de secado o de almacenamiento sin comprometer la integridad estructural del equipo.

IX. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL DESHIDRATADOR MODULAR HÍBRIDO

El proyecto evoluciona desde un diseño de TRL 4 validado en laboratorio hacia un sistema completo y calificado (TRL 8). El equipo está diseñado para procesar una variedad de productos andinos, incluyendo mora, uvilla, manzana y

frutilla, operando en un rango de temperatura crítica de 40-60°C para preservar nutrientes.

X. ESTRUCTURA Y MODULARIDAD

El dispositivo se compone de una unidad base que contiene el sistema de control y la fuente de energía, a la cual se acoplan módulos de secado estandarizados. Cada módulo incluye 10 bandejas de acero inoxidable de grado alimenticio, con una capacidad total por módulo de hasta 7 kg de producto fresco como se observa en la figura 1 [36]. La estructura metálica utiliza perfilería galvanizada y aislante tubular térmico de alta densidad para minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior [37], un factor crítico a altitudes de 3300 msnm donde la temperatura ambiente puede descender drásticamente.

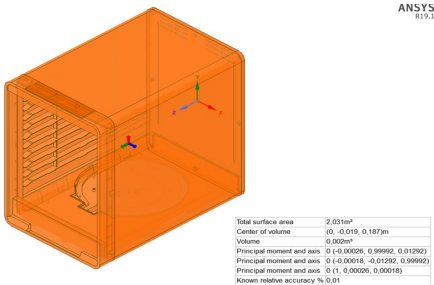


Fig. 1 Propiedades físicas del deshidratador.

XI. COMPONENTES DE LA MATRIZ ENERGÉTICA

La matriz híbrida se detalla en los siguientes subsistemas:

1. Captación Solar Térmica: Utiliza un colector de tubos de vacío para calentar aire directamente. Este método es superior a los colectores de placa plana en climas de altura debido a su mayor aislamiento y capacidad de operar bajo radiación difusa.
2. Respaldo de Biomasa: Un gasificador compacto de biomasa permite la combustión controlada de residuos agrícolas secos (cascarilla de cereales, madera residual). El calor generado se transfiere al aire de secado mediante un intercambiador de calor de tubos de cobre, evitando el contacto directo de los gases de combustión con el alimento.
3. Almacenamiento Térmico (Batería Térmica): Un contenedor aislado térmicamente lleno de material de almacenamiento (sensible o latente) actúa como un pulmón energético. Durante las horas de pico solar, el exceso de aire caliente se desvía a la batería para "cargarse"; durante la noche, el aire frío entrante circula a través de la batería antes de ingresar a la cámara de secado [38].
4. Sistema Fotovoltaico: Paneles solares de 950W alimentan un banco de baterías eléctricas que suministran energía a los ventiladores DC de flujo forzado y al sistema de control inteligente.

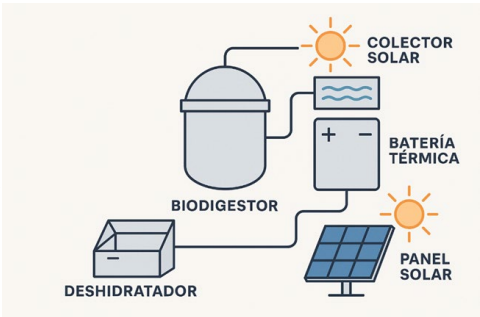


Fig. 2. Esquema conceptual del sistema híbrido de deshidratación solar con respaldo de biomasa y almacenamiento térmico

XII. MODELADO Y VALIDACIÓN COMPUTACIONAL

Se han realizado simulaciones utilizando ANSYS y SolidWorks Flow Simulation para optimizar la aerodinámica interna del equipo. Los resultados demuestran una distribución uniforme de la temperatura en todas las bandejas, con una varianza máxima de 2°C, lo cual es vital para asegurar una deshidratación homogénea y evitar la pérdida de calidad comercial del producto [39,40].

La cinética de secado se ha modelado utilizando el modelo matemático de Page:

$$MR = -\exp(-kt^n)$$

Donde **MR** es la relación de humedad, **k** es la constante de secado y **n** es el índice del modelo. Las simulaciones indican que, para rebanadas de tomate de 6 mm, se logra alcanzar una humedad final del 10% en aproximadamente 6 horas de operación híbrida continua [27].

XIII. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD E IMPACTO

El proyecto trasciende la innovación técnica para enfocarse en un impacto estructural en el desarrollo rural andino.

XIV. SOSTENIBILIDAD TECNOLÓGICA Y ECONÓMICA

El diseño modular facilita el mantenimiento preventivo y correctivo, permitiendo que los usuarios locales reemplacen partes sin necesidad de soporte técnico especializado. Desde el punto de vista económico, el análisis de costo-beneficio basado en el prototipo previo sugiere un tiempo de recuperación de la inversión de aproximadamente 8 años. Sin embargo, la mejora en la calidad del producto deshidratado [40] y la reducción de pérdidas del 30% al 5% podrían acortar este periodo a menos de 4 años en escenarios de alta productividad [41].

TABLA III.
PRESUPUESTO ESTIMADO DE DESARROLLO (TRL 8)

Item de Inversión	Período 1 (USD)	Período 2 (USD)	Total (USD)
Talento Humano (Desarrolladores)	3,636	10,908	14,544
Equipos (Colectores, Paneles)	0	15,456	15,456
Materiales de Estructura y TES	0	3,500	3,500
Gestión y Transferencia (Spin-off)	4,525	13,575	18,100
Presupuesto Total	8,161	43,439	51,600

XV. IMPACTO AMBIENTAL Y MITIGACIÓN DE CO2

La sustitución de fuentes de energía fósil por solar y biomasa tiene un efecto directo en la descarbonización de los procesos agroindustriales locales. Se estima que la implementación de este deshidratador mitiga hasta 169.10 toneladas de CO2 a lo largo de su vida útil de 30 años en comparación con sistemas basados en diésel o gas licuado de

petróleo (GLP) [9]. Además, el uso de residuos orgánicos como fuente de energía reduce las emisiones de metano que se generarían por la descomposición de desechos en vertederos a cielo abierto.

XVI. IMPACTO SOCIAL Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

El proyecto prevé la capacitación técnica de 50 agricultores en la comunidad de Nitiluisa, con un enfoque especial en el empoderamiento de las mujeres, proyectando un incremento del 40% en su participación en actividades productivas generadoras de ingresos. La colaboración con la Asociación de Servicios de Soldadura Amazonas (ASOSERSOLDAMAZ) asegura que el conocimiento de manufactura permanezca en el país, fortaleciendo el ecosistema de innovación local.

XVII. TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y MODELO DE NEGOCIO SPIN-OFF

Un resultado crítico de esta fase del proyecto es el desarrollo del "Plan Detallado de Creación de la Empresa". La estrategia de transferencia no se limita a la entrega de una donación, sino a la creación de una empresa derivada (spin-off) de la ESPOCH que gestione el ciclo de vida del producto.

XVIII. ANÁLISIS DEL MERCADO GLOBAL Y REGIONAL

El mercado global de máquinas deshidratadoras de alimentos alcanzó una valoración de 2.19 mil millones de dólares en 2024, con proyecciones de crecimiento constante debido al auge de los snacks saludables y la tendencia "plant-based". En América Latina, la demanda de tecnologías sostenibles para el procesamiento agrícola es alta, pero la oferta de equipos híbridos con almacenamiento térmico es prácticamente inexistente.

XIX. ESTRATEGIA DE COMERCIALIZACIÓN

La spin-off se centrará en un modelo de "valor por impacto", destacando los beneficios de ahorro energético y reducción de mermas. Los canales de distribución incluirán venta directa con demostraciones en campo en ferias agrícolas y alianzas estratégicas con ONGs y ministerios de agricultura que manejan fondos para la tecnificación rural. Se buscará el acceso a capital semilla e inversionistas ángeles que prioricen proyectos con criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG).

XX. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del modelo de utilidad del deshidratador modular híbrido representa un avance significativo en la soberanía tecnológica del Ecuador aplicada a la agricultura de altura. La transición exitosa hacia el nivel TRL 8 permitirá validar en condiciones reales la efectividad de la "batería térmica" para garantizar un secado ininterrumpido, eliminando la dependencia de las condiciones climáticas adversas de la región andina.

Las simulaciones y la vigilancia tecnológica confirman que la combinación de energía solar térmica, fotovoltaica y biomasa ofrece una eficiencia superior a los métodos

tradicionales, preservando la calidad nutricional de los alimentos y abriendo nuevas oportunidades de exportación para los pequeños productores de Nítiluisa. La modularidad del sistema asegura su escalabilidad, permitiendo que la tecnología se adapte tanto a microemprendimientos familiares como a centros de acopio comunitarios.

Como trabajos futuros, se plantea la optimización de los materiales de almacenamiento térmico mediante el uso de nanotecnología para aumentar la densidad energética y la integración de algoritmos de visión artificial para monitorear el cambio de color y textura del producto durante el secado en tiempo real [4]. La solicitud de propiedad intelectual ante el SENADI y la formalización de la spin-off tecnológica marcarán el inicio de una nueva etapa de transferencia tecnológica efectiva para el desarrollo rural sostenible del país.

REFERENCIAS

- [1] J. F. V. D. Cabrera J, "Simulación de un deshidratador híbrido indirecto activo mediante el software ANSYS", *Enfoque UTE*, vol. 12, núm. 4, pp. 29–44, 2010, doi: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.771>.
- [2] Venegas-Reyes E; Dehesa-Carrasco U, "Secado solar: una alternativa para conservar alimentos", *Divulgación de Ciencia y Educación*, vol. 2, núm. 3, pp. 50–52, 2024, doi: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.771>.
- [3] M. L. Acosta Miranda y L. Ángeles Hernández, "Disminuir la pérdida de alimentos en la producción agrícola mediante la deshidratación", *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 33, núm. 3, pp. 139–151, dic. 2021, doi: 10.37815/rte.v33n3.874.
- [4] S. S. Bhangé y S. S. Deshmukh, "Design and Testing of a Solar Biomass Hybrid Dryer for Vegetables Drying", *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 12, núm. 11, pp. 98–112, nov. 2025, doi: 10.14445/23488360/IJME-V12I11P110.
- [5] E. L. Rulazi, J. Marwa, B. Kichonge, y T. Kivevele, "Development and Performance Evaluation of a Novel Solar Dryer Integrated with Thermal Energy Storage System for Drying of Agricultural Products", *ACS Omega*, vol. 8, núm. 45, pp. 43304–43317, nov. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c07314.
- [6] D. Kong, Y. Wang, M. Li, y J. Liang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products", *Energy*, vol. 293, p. 130640, abr. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130640.
- [7] J. V. Briongos, S. Taramona, J. Gómez-Hernández, V. Mulone, y D. Santana, "Solar and biomass hybridization through hydrothermal carbonization", *Renew. Energy*, vol. 177, pp. 268–279, nov. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.05.146.
- [8] The Energy and Resources Institute, "Solar-biomass hybrid dryer with thermal energy storage", Gurugram, India, mar. 2024.
- [9] S. Kiyabu, J. S. Lowe, A. Ahmed, y D. J. Siegel, "Computational Screening of Hydration Reactions for Thermal Energy Storage: New Materials and Design Rules", *Chemistry of Materials*, vol. 30, núm. 6, pp. 2006–2017, mar. 2018, doi: 10.1021/acs.chemmater.7b05230.
- [10] 360iResearch, "Residential food dehydrator market: global forecast 2025–2030", Dublin, Ireland, ago. 2025.
- [11] A. Afzal *et al.*, "Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying", *Heliyon*, vol. 9, núm. 3, p. e14144, mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14144.
- [12] S. Suherman, H. Widuri, S. Patricia, E. E. Susanto, y R. J. Sutrisna, "Energy Analysis of a Hybrid Solar Dryer for Drying Coffee Beans", *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 9, núm. 1, pp. 131–139, feb. 2020, doi: 10.14710/ijred.9.1.131-139.
- [13] M. Zhumagulov, A. Omirbayeva, y D. Papurello, "Analysis of Fuel Gasification Using Solar Technology: A Patent Review", *Gases*, vol. 6, núm. 1, p. 3, ene. 2026, doi: 10.3390/gases6010003.
- [14] J. L. Jie Ling, E. S. Go, Y.-K. Park, y S. H. Lee, "Recent advances of hybrid solar - Biomass thermo-chemical conversion systems", *Chemosphere*, vol. 290, p. 133245, mar. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133245.
- [15] T. A. Yassen y H. H. Al-Kayiem, "Solar-biomass hybrid dryer enhanced by the Co-Gen technique", *Drying Technology*, vol. 34, núm. 3, pp. 287–295, feb. 2016, doi: 10.1080/07373937.2015.1051662.
- [16] Mahima Hardiya, "Synopsis Development of High Efficiency Solar Drying Systems for Agricultural Products Using Thermal Storage and Smart Control Strategies", 2025, *Oriental University Indore*.
- [17] M. Gallucci, "Startup unveils heat battery it says can decarbonize almost any factory", el 29 de enero de 2026.
- [18] A. Lingayat, P. Das, M. C. Gilago, y C. V.P., "A detailed assessment of paraffin waxed thermal energy storage medium for solar dryers", *Solar Energy*, vol. 261, pp. 14–27, sep. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.05.047.
- [19] S. D. S. Bhangé, "Thermal and drying efficiency evaluation of a solar-biomass hybrid system for Solanoideae family crops", *International Journal of Engineering Inventions*, vol. 14, núm. 6, pp. 11–17, 2025.
- [20] J. Ellis, R. Opoku, C. K. K. Sekyere, y A. K. Arkoh, "Solar crop dryer with thermal energy storage as backup heater", *Solar Compass*, vol. 8, p. 100058, dic. 2023, doi: 10.1016/j.solcom.2023.100058.
- [21] D. Kumar, P. Singh, P. Kalita, y P. Mahanta, "Thermodynamic analysis of a sustainable solar-biomass hybrid dryer with thermal energy storage systems", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 61, p. 103527, may 2025, doi: 10.1016/j.tsep.2025.103527.
- [22] N. Ali, O. Abida, M. Essalhi, M. Ouikhalfan, y B. Ul Haq, "An Integrated Sand Battery Module as Thermal Energy Storage Medium for Heat Recovery and Storage", *Journal of Energy Engineering*, vol. 152, núm. 2, abr. 2026, doi: 10.1061/JLEED9.EYENG-6192.
- [23] K. B. A. K. Pandey, S. Shahabuddin, M. Samykano, T. M, y R. Saidur, "Phase change materials integrated solar thermal energy systems: Global trends and current practices in experimental approaches", *J. Energy Storage*, vol. 27, p. 101118, feb. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101118.
- [24] S. S. Mousavi Ajarostaghi, L. Amiri, y S. Poncet, "Application of Thermal Batteries in Greenhouses", *Applied Sciences*, vol. 14, núm. 19, p. 8640, sep. 2024, doi: 10.3390/app14198640.
- [25] M. Sanchez-Chero, W. R. Miranda-Zamora, L. C. Flores-Mendoza, y J. Sanchez-Chero, "Development of a PLC/IoT Control System with Real-Time Concentration Monitoring for the Osmotic Dehydration of Fruits", *Automation*, vol. 6, núm. 4, p. 68, nov. 2025, doi: 10.3390/automation6040068.
- [26] J. M. Tabares-Martínez, A. Guzmán-López, M. G. Bravo-Sánchez, S. M. Aceves, Y. V. Pantoja-Pacheco, y J. P. Aguilera-Álvarez, "Evaluation of a Cyber-Physical System with Fuzzy Control for Efficiency Optimization in Rotary Dryers: Real-Time Multivariate Monitoring of Humidity, Temperature, Air Velocity and Mass Loss", *Technologies (Basel)*, vol. 13, núm. 9, p. 424, sep. 2025, doi: 10.3390/technologies13090424.
- [27] J. M. Tabares-Martínez, A. Guzmán-López, M. G. Bravo-Sánchez, A. I. Barranco-Gutiérrez, J. J. Martínez-Nolasco, y F. Villaseñor-Ortega, "Instrumentation and Evaluation of a Sensing System with Signal Conditioning Using Fuzzy Logic for a Rotary Dryer", *Technologies (Basel)*, vol. 13, núm. 2, p. 83, feb. 2025, doi: 10.3390/technologies13020083.
- [28] M. A. Rahman, S. M. M. Hasnain, P. Paramasivam, R. Zairov, y A. G. Ayanie, "Solar Drying for Domestic and Industrial Applications: A Comprehensive Review of Innovations and Efficiency Enhancements", *Global Challenges*, vol. 9, núm. 2, feb. 2025, doi: 10.1002/gch2.202400301.
- [29] N. Y. MONE, "A portable solar dome dehydrator", WO2021144766A1, el 22 de julio de 2021 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en:

- https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2021144766&_cid=P10-MLF9AP-77098-1
- [30] I. H. K. Klein Erhekabor, “Multipurpose solar drying tray assemblies and methods therefor”, US20200191479, el 18 de junio de 2020 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US296505280&_cid=P10-MLF9EI-81864-1
- [31] K. E. O. J. A. G. D. M. R. ILELEJI, “Modular collapsible solar dryer for multipurpose drying”, WO2017027813, el 17 de febrero de 2017 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2017027813&_cid=P10-MLF8YI-62158-1
- [32] 王金平徐少凡樊小平, “Solar dryer”, CN102889768A, 2013 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/CN102889768A/en>
- [33] P. K. M. S. P. P. A. B. J. N. C. S. S. S. M. L. P. P. V. E. K. A. P. V. GHOSH, “An improved solar dryer with enhanced efficiency of drying”, el 22 de noviembre de 2012 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2012156768>
- [34] J.-P. APPERT, “Housing Unit Module and Corresponding Housing Unit”, WO2009112719, el 17 de septiembre de 2009 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2009112719&_cid=P10-MLI8NR-83026-1
- [35] Stoll Fedna, “Thermal solar dehydrator”, el 5 de octubre de 1999 Consultado: el 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US39037039&_cid=P10-MLI8X9-90370-1
- [36] R. F. Arias Hinojosa, “Diseño de un prototipo de deshidratador híbrido de frutas para la Región Andina”, Proyecto de Investigación y Desarrollo, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2020. Accedido: 10 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/4cc7ff1f-31b3-4f11-972b-b2fdd8f5dbdb/content>
- [37] W. Amjad *et al.*, “Advanced Exergy Analyses of a Solar Hybrid Food Dehydrator”, *Energies (Basel)*, vol. 15, núm. 4, p. 1505, feb. 2022, doi: 10.3390/en15041505.
- [38] R. A. Rahman, Sulisty, y M. S. K. T. S. Utomo, “Detachable Heat Storage for Nighttime Dehydration in Solar Food Dryers”, *International Journal of Heat and Technology*, vol. 43, núm. 5, pp. 1869–1876, oct. 2025, doi: 10.18280/ijht.430526.
- [39] A. H. S. M. A. Barzigar, “AI for enhanced solar dryer performance: integration of PV/T panels, solar collectors, energy storage, biomass, and desalination units”, *Drying Technology*, vol. 43, núm. 13, pp. 1879–1880, 2025.
- [40] A. D. Rincón Quintero, L. A. Del Portillo Valdés, C. L. Sandoval Rodríguez, B. E. Tarazona Romero, y W. L. Rondón Romero, “Simulation of a flat solar collector with thermal storage for drying food”, *Scientia et Technica*, vol. 28, núm. 01, pp. 15–22, mar. 2023, doi: 10.22517/23447214.24835.
- [41] R. J. B. Gohain y P. P. Dutta, “Solar biomass hybrid drying and quality evaluation of *Eryngium foetidum* in an innovative newly developed solar dryer”, *Solar Energy*, vol. 270, p. 112416, mar. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112416.