

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS

“Desarrollo y evaluación experimental de un
sistema modular de secado indirecto mediante
aprovechamiento de calor residual en estufas
ecológicas”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

C. LUIS ARMANDO NUÑEZ BARRIONUEVO

DIRECTOR

MTRO. OSCAR MARTÍNEZ AGUIRRE

CO-DIRECTOR

DR. ERICK ALEJANDRO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Marzo de 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Fecha: 11 de marzo de 2026

C. Luis Armando Nuñez Barriónuevo

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Desarrollo y evaluación experimental de un sistema modular de secado indirecto mediante
aprovechamiento de calor residual en estufas ecológicas.

En la modalidad de: Tesis profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Erick Alejandro Hernández Domínguez

Dra. Aracely López Grijalva

Dr. Neín Farrera Vázquez

Firmas:

[Firma]
[Firma]
[Firma]

C.c.p. Expediente



Dedicatoria

A Dios, por ser el principio y el fin de todas las cosas, por la vida que me otorga y por la fortaleza espiritual que me sostuvo en los momentos de mayor incertidumbre. A Él agradezco la sabiduría para entender los fenómenos de Su creación.

A mis padres, Jorge Núñez y Paty Barrionuevo por ser el cimiento de mi formación y por su apoyo incondicional que hizo posible este sueño.

A mi hermano Eduardo Nuñez por su apoyo y compañía a lo largo de este camino.

A mi familia y amigos, por su compañía constante, su paciencia y por creer en mi capacidad incluso cuando el camino se tornaba complejo.

A mis directores, Mtro. Oscar Martínez y Dr. Erick Hernández y a los doctores Dr. Joel Moreira y Dr. Neín Farrera que formaron parte de este proceso académico, por su orientación, sus valiosas observaciones y el acompañamiento brindado durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mis maestros y al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, por brindar conocimiento, tiempo, espacio y recursos que contribuyeron no solo al desarrollo de este trabajo, sino también de manera significativa a mi formación académica y profesional.

Resumen

El objetivo general de esta investigación fue desarrollar y evaluar un sistema modular de secado indirecto acoplado a la chimenea de una cámara de combustión de biomasa para el aprovechamiento de calor residual. La caracterización térmica del conducto determinó un gradiente térmico de 57.2 °C (77.3 °C en la base y 20.1 °C en la salida), confirmando la viabilidad de recuperación energética. Se diseñó y construyó un prototipo de lámina galvanizada que opera por convección natural, logrando temperaturas de 36 °C con carga y hasta 65 °C en vacío. Para la validación experimental, se empleó una muestra patrón con una masa inicial de 2.535 g, la cual alcanzó un peso final de 1.075 g tras un tiempo total de 6 horas y 12 minutos. El proceso permitió reducir la humedad desde un 75 % (Cayo-Colca et al. 2021) hasta un 30 % en base húmeda, registrando una velocidad de remoción de agua de 0.414 g/h durante el periodo constante. Finalmente, el análisis del tiro térmico validó que la integración de la cámara modular no obstruye la evacuación de gases ni compromete la seguridad de la estufa, consolidando el prototipo como una tecnología de bajo costo y fácil implementación para la conservación de alimentos en contextos rurales.

Abstract

The overall objective of this research was to develop and evaluate a modular indirect drying system coupled to the chimney of a biomass combustion chamber for the utilization of waste heat. Thermal characterization of the duct determined a thermal gradient of 57.2 °C (77.3 °C at the base and 20.1 °C at the outlet), confirming the feasibility of energy recovery. A prototype made of galvanized sheet metal was designed and built, operating by natural convection and achieving temperatures of 36 °C under load and up to 65 °C under no-load conditions. For experimental validation, a standard sample with an initial mass of 2.535 g was used, which reached a final weight of 1.075 g after a total drying time of 6 hours and 12 minutes. The process reduced moisture content from 75% (Cayo-Colca et al. 2021) to 30% on a wet basis, registering a water removal rate of 0.414 g/h during the constant period. Finally, the thermal draft analysis validated that the integration of the modular chamber does not obstruct the evacuation of gases or compromise the safety of the stove, consolidating the prototype as a low-cost and easy-to-implement technology for food preservation in rural contexts.

Índice General

Dedicatoria	2
Resumen	3
Abstract	4
Índice de tablas	11
Índice de variables	12
Capítulo 1. Introducción	13
1.1. Entorno y conceptualización	13
1.1.1 Marco científico/técnico	13
1.1.2 Definiciones clave	14
1.1.3 Clasificación y bases conceptuales necesarias	15
1.2. Antecedentes y estado del arte	15
1.2.1 Seguridad alimentaria y pérdidas postcosecha en comunidades rurales	15
1.2.2 Estufas ecológicas y su uso en comunidades rurales	16
1.2.3 Tecnologías de secado de alimentos	18
1.2.4 Aprovechamiento del calor residual en los sistemas térmicos	19
1.2.5 Propuestas tecnológicas para chimeneas en el 3IER	19

1.3. Planteamiento del problema	20
1.4. Hipótesis	21
1.5. Justificación	21
1.6. Objetivo General	23
1.6.1 Objetivos particulares	23
1.7. Estructura del documento	23
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	24
2.1. Caracterización del potencial térmico de la chimenea	24
2.2. Fundamentos del secado indirecto de alimentos	25
2.3. Cinética de secado	25
2.4. Energía útil empleada en el proceso de secado	26
Capítulo 3. Metodología	27
3.1. Caracterizar el potencial térmico de la chimenea	27
3.1.1 Tipo y enfoque de estudio	27
3.1.2 Procedimiento realizado	27
3.1.3 Técnicas e instrumentos utilizados	27
3.1.4 Población y muestra	28
3.1.5 Estrategia de análisis	28

3.2. Diseñar y construir el prototipo modular	28
3.2.1 Tipo y enfoque de estudio	28
3.2.2 Procedimiento realizado	28
3.2.3 Técnicas e instrumentos utilizados	29
3.2.4 Población y muestra	29
3.2.5 Estrategia de análisis	29
3.3. Evaluar y comparar desempeño del sistema	29
3.3.1 Tipo y enfoque de estudio	29
3.3.2 Procedimiento realizado	29
3.3.3 Técnicas e instrumentos utilizados	30
3.3.4 Población y muestra	30
3.3.5 Estrategia de análisis	30
Capítulo 4. Resultados	31
4.1. Potencial térmico de la chimenea	31
4.2. Diseño y construcción del prototipo modular	33
4.2.1 Criterios de diseño aplicados	33
4.2.2 Justificación del área de intercambio térmico	34
4.2.3 Justificación del espesor del material	34

4.2.4 Separación entre bandejas	34
4.2.5 Estructura portante y bastidor del secador	35
4.2.6 Cotas de medidas	35
4.2.7 Modelo conceptual	36
4.2.8 Descripción del prototipo final y componentes integrados	37
4.2.9 Prototipo real	38
4.3. Evaluación y desempeño de la propuesta tecnológica	39
4.3.1 . Dinámica térmica y de humedad en vacío	39
4.3.2 Dinámica térmica y de humedad con carga	43
4.3.3 Procedimiento del desempeño térmico y de remoción de masa	48
5. Análisis y discusión de resultados	51
5.1. Interpretación del potencial térmico	52
5.2. Evaluación del diseño y operatividad del prototipo	52
5.3. Discusión del proceso de secado y comparativa	52
Recomendaciones o áreas de oportunidad	53
Referencias Bibliográficas	54
Anexos	58

Figura 1 .	Puntos de medición de la temperatura. Fuente: Propia.	32
Figura 2 .	Fotografía térmica de la chimenea. Fuente: Propia.	33
Figura 3 .	Estructura portante y bastidor del secador. Fuente: Propia	35
Figura 4 .	Cotas de medida del dispositivo propuesto. Fuente: Propia	36
Figura 5 .	Modelo conceptual. Fuente: Propia.	37
Figura 6 .	Descripción del Prototipo. Fuente: Propia.	38
Figura 7 .	El prototipo real. Fuente: Propia.	38
Figura 8 .	Posicionamiento de los sensores. Fuente: Propia.	39
Figura 9 .	Temperatura en tres niveles (Gradiente Térmico). Fuente: Propia.	40
Figura 10 .	Dinámica térmica en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.	41
Figura 11 .	Dinámica de humedad en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.	42
Figura 12 .	Dinámica térmica y de humedad en el ambiente interior. Fuente: Propia.	42
Figura 13 .	Dinámica térmica y de humedad en el ambiente exterior. Fuente: Propia.	43
Figura 14 .	Comportamiento térmico entre niveles, con fruta. Fuente: Propia.	44
Figura 15 .	Dinámica térmica en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.	45
Figura 16 .	. Dinámica de humedad en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.	46
Figura 17 .	Dinámica térmica y de humedad en el ambiente interior. Fuente: Propia.	47
Figura 18 .	Dinámica térmica y de humedad en el ambiente exterior. Fuente: Propia.	48

Figura 19 .	Masa inicial. Fuente: Propia.	49
Figura 20 .	Secado en prototipo. Fuente: Propia.	50
Figura 21 .	Curva de secado. Fuente: Propia.	50
Figura 22 .	Masa final. Fuente: Propia.	51

Índice de tablas

Tabla 1 . Marco científico/técnico	13
Tabla 2 . Definiciones clave.....	14
Tabla 3 . Base conceptual (definición breve y técnica)	15
Tabla 4 . Temperaturas medidas en la chimenea.	33
Tabla 5 . Especificaciones	34

Índice de variables

Concepto	Formulación teórica.	Base conceptual (definición breve y técnica)	Unidad
ΔT	Caracterización del potencial térmico de la chimenea.	Diferencia de temperatura entre la superficie de la chimenea y el ambiente.	(°C)
T_s	Caracterización del potencial térmico de la chimenea.	Temperatura superficial de la chimenea.	(°C)
T_a	Caracterización del potencial térmico de la chimenea.	Temperatura ambiente.	(°C)
X	Contenido de humedad en base húmeda.	Contenido de humedad del producto.	(kg)
m_h	Contenido de humedad en base húmeda .	Masa de agua contenida en el producto.	(kg)
m_t	Contenido de humedad en base húmeda.	Masa total del producto.	(kg)
R_s	Velocidad de secado.	Velocidad de secado.	(kg/h)
Δm	Velocidad de secado.	Masa de agua removida.	(kg)
Δt	Velocidad de secado.	Intervalo de tiempo.	(h)
t_s	Tiempo total de secado efectivo.	Tiempo total de secado.	(h)
t_f	Tiempo total de secado efectivo.	Tiempo en el que se alcanza la humedad final deseada.	(h)
t_i	Tiempo total de secado efectivo.	Tiempo inicial del proceso.	
Q_{evap}	Carga térmica de evaporación.	La energía requerida para evaporar el agua contenida en el producto.	(kJ)
m_{agua}	Carga térmica de evaporación.	Masa de agua evaporada.	(kg)
h_{fg}	Carga térmica de evaporación.	Calor latente de vaporización del agua.	(kJ/kg)

Capítulo 1. Introducción

1.1. Entorno y conceptualización

Esta sección presenta las bases conceptuales, definiciones y clasificaciones que estructuran el desarrollo de este prototipo, organizadas desde los fundamentos físicos hasta las aplicaciones operativas en el entorno de estudio.

1.1.1 Marco científico/técnico

Las estufas ecológicas operan mediante combustión de biomasa sólida, generando gases calientes que son evacuados a través de una chimenea metálica. Durante este proceso se establece un gradiente térmico significativo entre la base y la salida del conducto, lo que evidencia la presencia de energía térmica residual no aprovechada. En esta sección en la Tabla 1 se identifican y definen las variables termodinámicas y de transferencia de calor asociadas al comportamiento térmico de la chimenea, las cuales permiten cuantificar el potencial energético disponible para su recuperación.

Tabla 1. Marco científico/técnico

Concepto	Fundamento esencial	Uso en la tesis
Combustión de biomasa	Reacción exotérmica que libera energía térmica al oxidarse la leña.	Genera los gases calientes que establecen el potencial térmico del sistema.
Temperatura de gases de combustión	Variable termodinámica que indica el nivel energético del flujo gaseoso.	Determinar la temperatura en la base de la chimenea ($\approx 300\text{ }^{\circ}\text{C}$).
Temperatura de salida	Temperatura de los gases antes de disiparse al ambiente ($\approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Permite calcular el gradiente térmico disponible.
Gradiente térmico (ΔT)	Diferencia de temperatura entre dos puntos del sistema.	Cuantificar el potencial energético residual ($\Delta T = T_1 - T_2$).
Transferencia de calor por conducción	Mecanismo de transferencia a través de la pared metálica de la chimenea.	Explica el calentamiento superficial externo donde se acopla la cámara.
Transferencia de calor por convección natural	Movimiento del aire inducido por diferencias de densidad debido a temperatura.	Justifica el flujo térmico hacia la cámara de secado sin dispositivos mecánicos.
Energía térmica residual	Energía no utilizada en la cocción y disipada al ambiente.	Base conceptual para el diseño del sistema de recuperación térmica.

1.1.2 Definiciones clave

El secado de alimentos es un proceso de deshidratación que requiere el suministro controlado de energía térmica para inducir la evaporación del contenido de humedad del producto. Su desempeño depende de variables como temperatura del aire, contenido de humedad inicial y final, tiempo de exposición y energía requerida para el cambio de fase. En la Tabla 2 se establecen los parámetros físicos y energéticos que describen el proceso de secado indirecto, con el fin de vincular la energía térmica residual disponible con la demanda energética necesaria para la conservación de alimentos.

Tabla 2. Definiciones clave.

Concepto	Fundamento esencial	Uso en la tesis
Secado de alimentos	Proceso de deshidratación mediante suministro de energía térmica.	Fundamenta la conservación postcosecha en comunidades rurales.
Contenido de humedad inicial (Mi)	Relación entre masa de agua y masa total del producto antes del secado.	Determinar la cantidad de agua a remover.
Contenido de humedad final (Mf)	Humedad residual después del proceso de secado.	Evaluar estabilidad y conservación del producto.
Masa inicial del producto	Peso total del alimento antes del secado.	Variable base para cálculo de humedad removida.
Masa final del producto	Peso después del secado.	Permite estimar agua evaporada.
Energía evaporada (Qevap)	Energía requerida para el cambio de fase del agua.	Cuantificar el uso de calor no utilizado del sistema.
Temperatura de secado	Nivel térmico interno de la cámara.	Evaluar viabilidad del proceso de deshidratación.
Tiempo de secado	Duración necesaria para alcanzar la humedad final deseada.	Indicador comparativo frente al secado solar tradicional.
Eficiencia térmica del sistema	Relación entre energía útil empleada en evaporación y energía disponible.	Medir desempeño del prototipo.

1.1.3 Clasificación y bases conceptuales necesarias

La presente investigación es de enfoque cuantitativo y tipo aplicada, con un diseño experimental orientado al desarrollo y validación de un sistema de secado indirecto de alimentos acoplado a la chimenea de una estufa ecológica. El estudio tiene un alcance descriptivo–explicativo y se desarrolla bajo un esquema transversal, utilizando mediciones experimentales de temperatura, tiempo de secado y eficiencia energética.

Tabla 3. Base conceptual (definición breve y técnica)

Concepto	Fundamento esencial	Uso en la tesis
Recuperación de calor residual	Aprovechamiento de energía térmica que normalmente se disipa al ambiente.	Fundamenta el desarrollo del sistema modular acoplado a la chimenea.
Intercambio térmico indirecto	Transferencia de calor sin contacto entre gases de combustión y producto alimenticio.	Garantiza inocuidad del proceso de secado.
Acoplamiento térmico externo	Integración física del sistema de secado alrededor de la chimenea sin modificar su operación interna.	Permite aprovechar la superficie caliente sin alterar el tiro ni la combustión.
Cámara de secado modular	Volumen confinado diseñado para distribuir aire caliente por convección natural.	Constituye el prototipo desarrollado y evaluado experimentalmente.
Flujo convectivo ascendente	Movimiento natural del aire calentado que asciende por diferencia de densidad.	Permite circulación interna del aire sin ventilación forzada.
Distribución térmica interna	Comportamiento del perfil de temperatura dentro de la cámara.	Evaluar uniformidad y desempeño del prototipo en vacío y con carga.
Integración funcional estufa–secador	Operación simultánea de cocción y secado sin interferencia estructural ni energética.	Validar que el sistema no afecta la seguridad ni el funcionamiento original.
Innovación tecnológica incremental	Mejora funcional sobre tecnología existente sin modificar su principio operativo.	Clasifica el aporte tecnológico del proyecto a nivel ingeniería.

1.2. Antecedentes y estado del arte

1.2.1 Seguridad alimentaria y pérdidas postcosecha en comunidades rurales

La seguridad alimentaria en comunidades rurales de países en desarrollo se ve afectada por las altas pérdidas postcosecha, especialmente en climas húmedos y tropicales, lo cual compromete el acceso a alimentos suficientes, seguros y nutritivos (Gustavsson, 2011).

Diversos estudios reportan que entre el 20 % y el 40 % de la producción agrícola en regiones rurales se pierde después de la cosecha, principalmente por prácticas inadecuadas de secado, almacenamiento y conservación (Kader, 2005). Estas pérdidas afectan de manera directa el autoconsumo familiar y reducen la disponibilidad de alimentos durante periodos de escasez, incrementando la vulnerabilidad alimentaria de las comunidades.

En regiones rurales con alta marginación, como las zonas tropicales y subhúmedas, la dependencia del secado tradicional al sol constituye una limitante significativa. Las condiciones climáticas adversas, como lluvias frecuentes y alta humedad relativa, dificultan la reducción del contenido de humedad en productos agrícolas, favoreciendo el deterioro microbiológico y el desarrollo de hongos (Affognon et al., 2015). Esta situación impacta de manera negativa la calidad nutricional de los alimentos y limita su tiempo de almacenamiento.

Asimismo, estudios realizados en comunidades rurales de América Latina señalan que la falta de tecnologías apropiadas para la conservación de alimentos incrementa la inseguridad alimentaria, aun cuando exista producción agrícola suficiente (HLPE, 2014). La adopción de tecnologías de bajo costo, adaptadas al contexto local y que utilicen recursos energéticos disponibles, es identificada como una estrategia clave para reducir pérdidas postcosecha y mejorar la resiliencia alimentaria.

En este contexto, la literatura coincide en que el desarrollo de sistemas de conservación de alimentos independientes de las condiciones climáticas, orientados al autoconsumo y compatibles con las prácticas rurales existentes, representa una necesidad prioritaria para fortalecer la seguridad alimentaria en comunidades rurales (Parfitt et al., 2010).

1.2.2 Estufas ecológicas y su uso en comunidades rurales

En el mundo mueren 6.7 millones de personas debido a enfermedades no transmisibles como accidentes cardiovasculares, cardiopatía isquémica, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cáncer de pulmón debido a la contaminación del aire por la acción de la cocción de los alimentos en el hogar, siendo los más vulnerables mujeres y niños, de acuerdo con la OMS 2100 millones de personas cocinan en fogones de fuego abierto

Por otra parte, el uso irracional de leña provoca deforestación, desencadenando un efecto dominó de daños: suelos inestables, más emisiones de carbono, desequilibrios climáticos locales y destrucción de la fauna.

Las estufas de biomasa continúan siendo la principal tecnología de cocción en comunidades rurales de países en desarrollo, debido a su bajo costo, disponibilidad de combustible y adaptación al contexto local. La literatura revisada indica que estas estufas desempeñan un papel relevante en el desarrollo sostenible al mejorar la eficiencia energética del proceso de cocción y reducir los impactos negativos en la salud asociados a la combustión de leña en espacios cerrados.

Una característica común de muchos diseños de estufas mejoradas es la incorporación de una chimenea metálica para la evacuación de los gases de combustión. El análisis del estado del arte muestra que la mayor parte de las investigaciones sobre estufas mejoradas se ha centrado en optimizar la combustión, reducir emisiones contaminantes y evaluar impactos en salud y consumo de combustible. En contraste, el aprovechamiento del calor residual generado en la chimenea para aplicaciones térmicas secundarias ha recibido atención limitada, a pesar de su potencial para incrementar la eficiencia global del sistema (Mehetre et al., 2017)

(Champier et al., 2010; Raman, Ram, & Gupta, 2014) exploraron el aprovechamiento del calor residual generado en estufas de biomasa, principalmente con el objetivo de incrementar la eficiencia energética del sistema o generar energía eléctrica auxiliar.

(Killander & Bass, 1996; Nuwayhid & Hamade, 2005) estudiaron generadores termoeléctricos instalados en superficies externas de estufas de leña, destacando que las temperaturas en las paredes o chimeneas (del orden de 100–300 °C) son suficientes para recuperar energía útil.

No obstante, como se señala en la revisión de (Mehetre et al., 2017)., estas investigaciones se han centrado principalmente en la generación eléctrica, la mejora de la eficiencia de cocción o el calentamiento de agua, y han sido desarrolladas mayoritariamente en prototipos experimentales o sistemas de mayor complejidad técnica. En la literatura revisada no se identifican dispositivos orientados al secado indirecto de alimentos o leña mediante el aprovechamiento del calor residual de la chimenea.

1.2.3 Tecnologías de secado de alimentos

El secado constituye una de las metodologías de conservación de alimentos más extendidas y de mayor antigüedad, fundamentada en la reducción crítica del contenido de humedad del producto. Este proceso inhibe significativamente la actividad enzimática y el crecimiento de microorganismos patógenos y de descomposición (Mujumdar, 2006a). Para el contexto específico de las comunidades rurales en entornos de desarrollo, esta tecnología adquiere una relevancia estratégica, dada su inherente simplicidad operativa, el bajo requerimiento de infraestructura compleja y su idoneidad para ser aplicada directamente a escala local.

El método más común en zonas rurales es el secado tradicional al sol, debido a su bajo costo y facilidad de implementación. No obstante, diversos estudios señalan que este método presenta limitaciones importantes, como la dependencia de las condiciones climáticas, tiempos prolongados de secado, exposición del alimento a contaminantes y falta de control sobre la temperatura y la humedad relativa (Esper & Mühlbauer, 1998a).

Como alternativa, se han desarrollado secadores solares indirectos, los cuales separan la fuente de calor del alimento y permiten mejorar la calidad del producto seco mediante un control más uniforme de la temperatura. Aunque estos sistemas representan un avance respecto al secado tradicional, su desempeño sigue dependiendo de la radiación solar disponible y, en muchos casos, requieren materiales adicionales o espacios específicos, lo que limita su adopción en comunidades rurales de alta marginación (Kumar et al., 2014)

Por otro lado, el secado mediante aire caliente en cámaras controladas ofrece mejores condiciones de operación y reducción significativa del tiempo de secado; sin embargo, estos sistemas suelen depender de fuentes externas de energía eléctrica o combustibles comerciales, lo que los hace poco viables para aplicaciones domésticas rurales. En este contexto, la literatura resalta la necesidad de tecnologías de secado de baja temperatura que aprovechen fuentes de calor disponibles localmente, con diseños simples, pasivos y compatibles con prácticas rurales existentes (Mujumdar & Law, 2010)

1.2.4 Aprovechamiento del calor residual en los sistemas térmicos

El aprovechamiento de calor residual es una estrategia orientada a incrementar la eficiencia energética de sistemas térmicos mediante la recuperación de energía que, de otro modo, se disipa al ambiente. Este enfoque ha sido ampliamente estudiado en procesos industriales y energéticos, donde se ha demostrado que una fracción significativa de la energía generada se pierde a través de corrientes de gases calientes y superficies de alta temperatura (Akbari et al., 2018). La recuperación de este calor permite reducir el consumo energético y mejorar el desempeño global del sistema.

En aplicaciones de pequeña escala, el aprovechamiento de calor residual ha sido explorado principalmente en sistemas de combustión de biomasa, donde los gases de salida y las superficies metálicas alcanzan temperaturas suficientes para transferir energía útil. Diversos estudios señalan que estos flujos térmicos pueden ser utilizados mediante intercambiadores de calor simples, sin necesidad de modificar el proceso principal de combustión (Raman, Ram, & Murali, 2014)

En conclusión, el aprovechamiento del calor residual en estufas ecológicas se presenta como una oportunidad para el desarrollo de tecnologías simples, de bajo costo y adaptadas al contexto rural, capaces de mejorar la eficiencia energética del sistema y contribuir a la seguridad alimentaria mediante la conservación de alimentos.

1.2.5 Propuestas tecnológicas para chimeneas en el 3IER

(Medrano, 2016) Crea un prototipo que se adapta a la chimenea en el cual utiliza el efecto Seebeck de celdas Peltier para generar energía mediante la transferencia de calor de la chimenea. Si bien se han propuesto en el instituto algunas tecnologías para aprovechar el calor residual de las estufas dejando la puerta para proponer más soluciones.

En la tesis de maestría de (Collins, 2019) propone una estufa ecológica multifuncional leña-biomasa donde además propone unas charolas que se encuentran en la parte de superior del

comal y cerca de la chimenea para el secado de alimentos sin embargo, carece de aislamiento, por otra parte

Gutiérrez (2024) desarrolló un secador híbrido con una chimenea de trayecto horizontal inferior y vertical lateral, diseñada con recubrimiento térmico para maximizar la remoción de humedad. Aunque el sistema es eficiente, su arquitectura rígida impide la integración en estufas ecológicas ya instaladas. A diferencia de este modelo, la presente investigación propone un diseño modular externo que no requiere modificaciones estructurales, facilitando su adopción tecnológica en equipos existentes.

1.3. Planteamiento del problema

Las comunidades rurales de Chiapas dependen en gran medida de la producción local de alimentos para el autoconsumo y *carecen de dispositivos adecuados para la preservación y almacenamiento de productos agrícolas*, lo que tiene como consecuencia una falta de seguridad alimentaria a lo largo del año, además del clima predominante cálido húmedo y cálido subhúmedo, lo cual dificulta el secado tradicional de alimentos, método usado en estas zonas.

Para contribuir con el desarrollo de estas comunidades para mejorar la calidad de vida y reducir riesgos a la salud se han implementado estufas ecológicas de leña, equipadas con chimeneas metálicas cuadradas, durante el funcionamiento de las estufas ecológicas se genera una cantidad significativa de *energía térmica residual*, particularmente en la chimenea aproximadamente de 300 °C a la salida de la cámara de combustión y 90 °C en la salida al ambiente. Actualmente, este calor residual es completamente disipado al entorno sin ningún tipo de reaprovechamiento energético.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, la chimenea constituye un elemento con alto potencial para la recuperación de energía térmica proveniente de los gases de combustión, la cual podría ser utilizada para procesos de baja y media temperatura, como el secado indirecto de alimentos o leña.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar un dispositivo complementario para la chimenea de estufas ecológicas ya instaladas, que permita aprovechar el calor residual mediante un sistema de secado indirecto, sin contacto entre los gases de combustión y el producto, y sin afectar la seguridad, el tiro ni el desempeño térmico de la estufa.

Si bien se han dado avances para la recuperación de calor disipado de la chimenea crear un dispositivo modular adaptable a cualquier forma de chimenea dado lo anterior, se plantea como problema de investigación la falta de un sistema de secado eficiente que aproveche el calor residual de la chimenea de estufas ecológicas.

1.4. Hipótesis

El aprovechamiento del calor residual de la chimenea de una cámara de combustión de biomasa, mediante un sistema modular de secado indirecto, permitiría reducir el tiempo de secado y mejorar el desempeño térmico del proceso en comparación con el secado solar tradicional, sin afectar el funcionamiento ni la seguridad de la estufa.

1.5. Justificación

Esta investigación es necesaria porque en comunidades rurales se pierden alimentos por falta de métodos de conservación adecuados, por otra parte, existe calor residual disponible en las estufas ecológicas ya implementadas; sin embargo no están diseñadas para aprovechar esa energía residual, lo que deja sin resolver simultáneamente un problema de seguridad alimentaria y de ineficiencia energética.

Esta investigación es importante porque es posible resolver dos problemas con un solo sistema: mejorar la conservación de alimentos y aumentar la eficiencia energética de estufas ya instaladas, sin aumentar el consumo de leña ni introducir tecnologías complejas o costosas.

Esta investigación aporta:

En lo técnico: La investigación propone aprovechar el calor residual de la chimenea de estufas para secar alimentos. Mediante una cámara modular y desmontable, se integra un sistema de

secado indirecto que aumenta la eficiencia energética sin afectar la operación ni seguridad de la estufa, ni consumir energía adicional.

En lo ambiental: El uso del calor residual para el secado de alimentos y leña permite un uso más eficiente de la energía contenida en la biomasa, sin aumentar el consumo de leña ni las emisiones asociadas a la combustión. Al mejorar la eficiencia del sistema de cocción y secado, se contribuye indirectamente a la reducción de la presión sobre los recursos forestales, promoviendo prácticas más sostenibles en el uso de la leña como fuente energética en comunidades rurales.

En lo social: En zonas rurales marginadas de Chiapas, las actividades de preparación de alimentos, manejo de leña y secado tradicional recaen principalmente en las mujeres, lo que incrementa su carga de trabajo doméstico no remunerado. La dependencia del secado al sol exige tiempo adicional de supervisión y exposición constante a condiciones climáticas variables, afectando la organización de sus jornadas laborales. La implementación de un sistema de secado que aproveche el calor residual de estufas ecológicas permite realizar el proceso de conservación de manera simultánea a la cocción, reduciendo tiempo y esfuerzo sin modificar las rutinas cotidianas. Bajo el enfoque de justicia energética, la propuesta contribuye a un uso más equitativo y eficiente de la energía disponible en el hogar, fortaleciendo la autosuficiencia alimentaria y disminuyendo desigualdades asociadas al trabajo doméstico en comunidades rurales.

En lo económico: El sistema propuesto se basa en el uso de una fuente de energía ya disponible, lo que elimina la necesidad de equipos eléctricos o combustibles adicionales para el secado de alimentos. Esto representa una reducción de costos para las familias rurales, asimismo, el diseño modular y de baja complejidad técnica favorece su fabricación y mantenimiento con materiales accesibles, incrementando la viabilidad económica del sistema en contextos de alta marginación.

1.6. Objetivo General

Desarrollar y evaluar un sistema modular de secado indirecto acoplado a la chimenea de una cámara de combustión de biomasa que aproveche el calor residual generado durante la combustión de leña para la conservación de alimentos.

1.6.1 Objetivos particulares

1. Caracterizar el potencial térmico de la chimenea de una cámara de combustión de biomasa mediante la medición de perfiles de temperatura bajo condiciones reales de operación.
2. Diseñar y construir un prototipo modular de cámara de secado indirecto acoplable a la chimenea, sin afectar el funcionamiento ni las condiciones de seguridad de la estufa.
3. Evaluar y comparar el desempeño del sistema prototipo de secado en condiciones de operación en vacío y con carga de producto alimenticio frente al secado solar tradicional, utilizando indicadores de tiempo de secado.

1.7. Estructura del documento

Este documento se organiza en cinco capítulos estructurados de forma secuencial y alineados con los objetivos de investigación:

Capítulo 1. Introducción: Contextualiza la investigación, define el problema, establece la hipótesis, justifica el estudio y presenta los objetivos.

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos: Presenta los principios científicos y tecnológicos organizados según cada objetivo específico.

Capítulo 3. Metodología: Describe los procedimientos, materiales y técnicas empleados para el cumplimiento de cada objetivo.

Capítulo 4. Resultados y Discusión: Expone y analiza los hallazgos experimentales, organizados por objetivo.

Capítulo 5. Conclusiones: Sintetiza los principales hallazgos, establece conclusiones específicas por objetivo y propone recomendaciones.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos utilizados en esta investigación, los cuales establecen la base científica para el diseño y la validación del sistema de secado. El análisis comienza con la caracterización térmica de la chimenea como fuente de energía residual, seguido por los principios del secado indirecto que garantizan la inocuidad alimentaria. Asimismo, se describen las ecuaciones de cinética de secado y los parámetros de transferencia de energía necesarios para evaluar cuantitativamente la eficiencia del prototipo. Este marco conceptual permite interpretar los fenómenos físicos que ocurren durante el proceso y justifica la viabilidad técnica de la recuperación de energía térmica residual propuesta.

2.1. Caracterización del potencial térmico de la chimenea

Durante la operación de estufas ecológicas que utilizan biomasa como combustible, la combustión de la leña genera gases calientes que ascienden a través de la chimenea. Estos gases transfieren energía térmica hacia las paredes metálicas del conducto, generando gradientes de temperatura significativos a lo largo de su longitud. Esta energía térmica, que normalmente se disipa al ambiente, constituye un calor residual susceptible de ser aprovechado (Bhattacharya, 2015; Jetter et al., 2012).

La caracterización del potencial térmico de la chimenea se realiza mediante la medición de perfiles de temperatura superficial bajo condiciones reales de operación. El parámetro fundamental para evaluar este potencial es la diferencia de temperatura entre la superficie de la chimenea y el ambiente, expresada como:

$\Delta T = T_s - T_a$	(1)
------------------------	-----

Donde T_s es la temperatura superficial de la chimenea (°C) y T_a es la temperatura ambiente (°C). Este gradiente térmico permite identificar las zonas de mayor disponibilidad energética para el acoplamiento del sistema de secado.

2.2. Fundamentos del secado indirecto de alimentos

El secado de alimentos es un proceso de conservación que consiste en la remoción parcial del contenido de humedad mediante la aplicación controlada de calor (Fellows, 2017; Mujumdar, 2006b). En el secado indirecto, el alimento no tiene contacto directo con la fuente de calor ni con los productos de la combustión, lo que garantiza la inocuidad y calidad del producto final.

La variable principal para evaluar el proceso de secado es el contenido de humedad del producto, el cual se determina en base húmeda mediante la expresión:

$X = \frac{m_h}{m_t}$	(2)
-----------------------	------

Donde m_h es la masa de agua contenida en el producto (kg) y m_t es la masa total del producto (kg) (Mujumdar, 2006b).

2.3. Cinética de secado

La velocidad de secado se evalúa a partir de la pérdida de masa del producto en función del tiempo, calculada como:

$R_s = \frac{\Delta m}{\Delta t}$	(3)
-----------------------------------	------

Donde Δm es la masa de agua removida (kg) y Δt es el intervalo de tiempo (h). Este parámetro permite analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de operación (Mujumdar, 2006b).

El tiempo total de secado se define como el intervalo requerido para alcanzar una humedad final adecuada para la conservación del alimento:

$t_s = t_f - t_i$	(4)
-------------------	------

Donde t_i es el tiempo inicial del proceso y t_f es el tiempo en el que se alcanza la humedad final deseada (Esper & Mühlbauer, 1998b).

Este indicador se emplea para comparar el desempeño del sistema propuesto con el secado solar tradicional, permitiendo evaluar mejoras en eficiencia y estabilidad del proceso.

2.4. Energía útil empleada en el proceso de secado

La energía requerida para evaporar el agua contenida en el producto se calcula mediante:

$Q_{evap} = m_{agua} h_{fg}$	(5)
------------------------------	------

Donde m_{agua} masa de agua evaporada en kilogramos y h_{fg} calor latente de vaporización del agua (kJ/kg).

Para temperaturas de secado entre 35 °C y 60 °C, el valor promedio de h_{fg} es aproximadamente 2400 kJ/kg. Este parámetro permite cuantificar la energía útil transferida desde el calor residual hacia el producto alimenticio, constituyendo un indicador tecnológico del aprovechamiento térmico del sistema.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Caracterizar el potencial térmico de la chimenea

3.1.1 Tipo y enfoque de estudio

Estudio experimental, cuantitativo y descriptivo, realizado en condiciones reales de operación doméstica. Se emplea medición directa de variables térmicas sin manipulación de la combustión habitual

3.1.2 Procedimiento realizado

Paso 1: Instalación de sensores de temperatura en:

- Base de la chimenea
- Parte superior
- Ambiente exterior

Paso 2: Operación normal de la estufa con carga típica de leña.

Paso 3: Registro de temperaturas cada intervalo definido.

Paso 4: Determinación del diferencial térmico mediante ecuación 1.

Paso 5: Identificación de temperaturas máximas, mínimas y promedio durante la jornada.

3.1.3 Técnicas e instrumentos utilizados

- Termopares tipo K
- Termómetro digital multipunto
- Cronómetro
- Bitácora de registro manual o digital

3.1.4 Población y muestra

Población: Cámara de combustión de biomasa o estufas ecológicas instaladas en comunidades rurales.

Muestra: Una estufa en operación real, evaluada durante dos jornadas completas de combustión.

3.1.5 Estrategia de análisis

- Cálculo de promedio térmico.
- Cálculo de ΔT promedio y máximo.
- Análisis descriptivo del perfil térmico.
- Determinación de disponibilidad térmica aprovechable.

3.2. Diseñar y construir el prototipo modular

3.2.1 Tipo y enfoque de estudio

Estudio experimental aplicado y de desarrollo tecnológico, con validación funcional.

3.2.2 Procedimiento realizado

Paso 1: Diseño geométrico basado en dimensiones reales de la chimenea.

Paso 2: Construcción de cámara modular desmontable.

Paso 3: Instalación sin modificar estructura original.

Paso 4: Verificación de:

- Estabilidad estructural
- No obstrucción del tiro
- No retorno de humo

Paso 5: Medición de temperatura interna en vacío.

3.2.3 Técnicas e instrumentos utilizados

- Diseño asistido por esquemas dimensionales
- Lámina metálica y material aislante
- Termómetros digitales
- Inspección visual de flujo de gases

3.2.4 Población y muestra

- Prototipo único acoplado a la estufa caracterizada.
- Evaluación funcional en dos jornadas de operación.

3.2.5 Estrategia de análisis

- Comparación de temperaturas antes y después del acoplamiento.
- Verificación de que no exista disminución significativa del tiro.
- Confirmación de estabilidad térmica interna ($>35^{\circ}\text{C}$ promedio).

3.3. Evaluar y comparar desempeño del sistema

3.3.1 Tipo y enfoque de estudio

Estudio experimental comparativo cuantitativo.

3.3.2 Procedimiento realizado

Paso 1: Selección de producto agrícola

Paso 2: Registro de masa inicial m_i

Paso 3: Secado en prototipo

Paso 4: Registro periódico de la masa

Paso 5: Determinar peso final de la masa m_f

Paso 6: Cálculo de humedad removida ecuación 2

Paso 7: Cálculo de velocidad y tiempo de secado ecuación 3 y 4

Paso 8: Cálculo de energía evaporada ecuación 5

3.3.3 Técnicas e instrumentos utilizados

- Balanza digital (precisión en gramos)
- Termómetro digital
- Cronómetro
- Higrómetro ambiental
- Registro fotográfico

3.3.4 Población y muestra

- Producto agrícola local de autoconsumo.
- Dos corridas experimentales en prototipo.
- Secado solar como sistema de referencia.

3.3.5 Estrategia de análisis

- Cálculo de tiempo total de secado mediante ecuación 4

Comparación de:

- Tiempo de secado
- Humedad final alcanzada
- Energía evaporada

Determinación de porcentaje de aprovechamiento térmico mediante ecuación 5

Comparación cualitativa de calidad del producto.

La metodología adoptada es de carácter experimental aplicado, ya que se basa en la medición directa de variables térmicas y de masa en condiciones reales de operación doméstica.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación experimental del sistema modular de secado indirecto acoplado a la chimenea de una cámara de combustión de biomasa. Los resultados se estructuran en función de los objetivos específicos planteados, garantizando correspondencia directa entre la metodología aplicada y las variables medidas en campo.

En primer lugar, se expone la caracterización térmica de la chimenea bajo condiciones reales de operación, mediante el análisis de los perfiles de temperatura registrados en la base y en la salida de la chimenea. Posteriormente, se presentan los resultados del comportamiento térmico de la cámara de secado en vacío, incluyendo temperatura interior, diferencial térmico respecto al ambiente y condiciones de humedad relativa. Finalmente, se analiza el desempeño del sistema con carga de producto agrícola, determinando la masa de agua removida, la energía asociada al proceso de evaporación y la eficiencia global de aprovechamiento del calor residual, así como su comparación con el secado solar tradicional.

Los datos presentados corresponden a mediciones realizadas en condiciones reales de uso doméstico, lo que permite evaluar el funcionamiento del sistema en un contexto operativo representativo. El análisis se desarrolla de manera cuantitativa, empleando únicamente las ecuaciones establecidas en el marco teórico y asegurando coherencia entre los objetivos específicos y los resultados obtenidos.

4.1. Potencial térmico de la chimenea

Con el propósito de determinar la disponibilidad de energía térmica susceptible de reutilización, se realizó la medición de la temperatura en dos puntos estratégicos de la chimenea de la cámara de combustión de biomasa: en la base del ducto, próxima a la zona de combustión, y en la salida hacia el ambiente, como se observa en la figura 1.

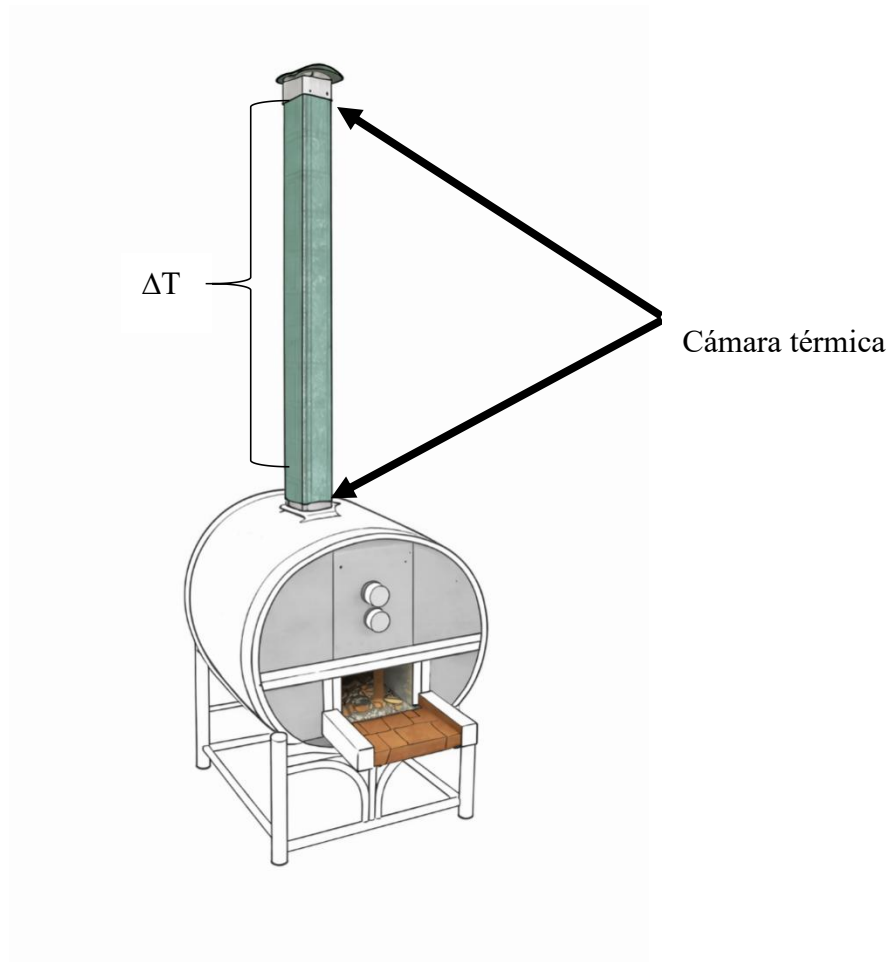


Figura 1. Puntos de medición de la temperatura. Fuente: Propia.

Estas mediciones permiten establecer el gradiente térmico existente a lo largo del conducto y cuantificar el potencial de calor residual disponible para su recuperación. Los resultados observados en la figura 2 se presentan en la Tabla 4.

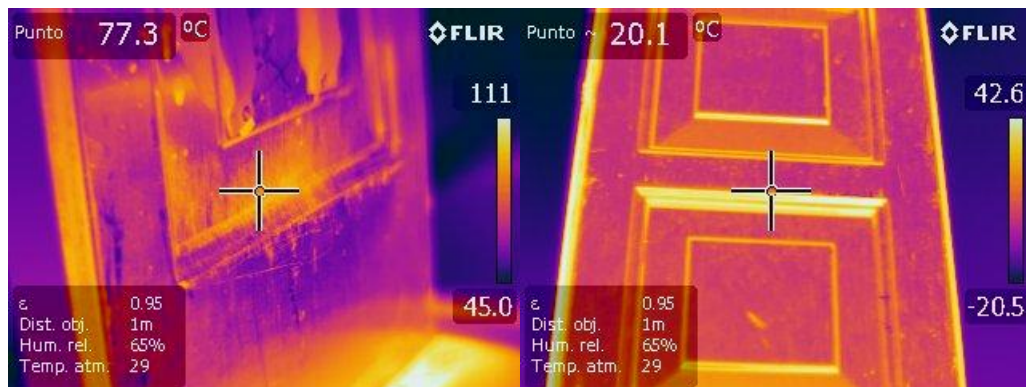


Figura 2. Fotografía térmica de la chimenea. Fuente: Propia.

Tabla 4. Temperaturas medidas en la chimenea.

Punto de medición	Temperatura (°C)	Condición de medición
Base de la chimenea	77.3	Operación Estable
Salida de la chimenea	20	Operación Estable

Estos valores indican una disminución térmica significativa a lo largo del ducto. El gradiente térmico obtenido se determina mediante:

$$\Delta T = \Delta_{base} - \Delta T_{salida}$$

$$\Delta T = 77.3 - 20.1 = 57.2 \text{ } ^\circ C$$

Este diferencial térmico de 57.2 °C evidencia la existencia de una cantidad considerable de energía residual que no es aprovechada en el proceso primario de cocción y que se disipa hacia el ambiente a través del conducto. Desde el punto de vista energético, este resultado confirma la viabilidad técnica de implementar un sistema de recuperación de calor acoplado a la chimenea, ya que existe un gradiente suficiente para inducir transferencia de calor hacia una cámara de secado indirecto sin interferir con la operación.

4.2. Diseño y construcción del prototipo modular

4.2.1 Criterios de diseño aplicados

El dimensionamiento de la cámara de secado se estableció a partir del diferencial térmico determinado durante la caracterización experimental de la chimenea, calculado mediante la Ecuación (1). El ΔT promedio obtenido permitió confirmar la existencia de un gradiente térmico

suficiente para inducir un régimen de convección natural estable dentro de un volumen confinado, condición necesaria para el secado indirecto sin aporte energético adicional.

4.2.2 Justificación del área de intercambio térmico

El área efectiva de captación se definió mediante la configuración de un espacio anular alrededor de la chimenea rectangular, con claros de 20 cm en los laterales y 15 cm en las caras frontal y posterior. Esta geometría fue seleccionada para garantizar contacto térmico indirecto suficiente sin alterar el tiro natural del sistema. Las pruebas en vacío evidenciaron temperaturas internas máximas de 65.6 °C y un diferencial térmico interior-ambiente aproximado de 35 °C, lo que valida que el área construida es coherente con el potencial térmico previamente cuantificado.

4.2.3 Justificación del espesor del material

Se empleó lámina galvanizada comercial como material estructural de la cámara, priorizando estabilidad mecánica, disponibilidad local y factibilidad económica. Aunque el material presenta conductividad térmica elevada, la respuesta térmica experimental demostró capacidad de acumulación y mantenimiento de temperaturas superiores a 60 °C durante periodos prolongados. En consecuencia, el espesor adoptado no limitó el desempeño térmico bajo condiciones de operación real.

4.2.4 Separación entre bandejas

La incorporación de seis charolas con separación vertical uniforme se definió para permitir el ascenso continuo del flujo convectivo y la distribución homogénea del aire caliente dentro de la cámara. La estabilidad térmica observada en las curvas experimentales, particularmente durante la meseta operativa de mayor combustión, indica que la configuración geométrica evita obstrucciones al flujo y favorece la estratificación térmica controlada.

Tabla 5. Especificaciones

Parámetro	Unidad de medida
Altura total de la cámara	110 cm

Volumen útil de secado	0.40 m ³
Número y área de bandejas	6 unidades (0.5625 m ²)
Material estructural	Aluminio y acero
Material de bandejas	Madera y malla de acero inoxidable

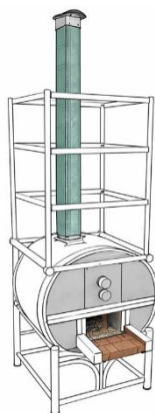


Figura 3. Estructura portante y bastidor del secador. Fuente: Propia

4.2.5 Estructura portante y bastidor del secador

El diseño se centra en una estructura de soporte que actúa como el chasis principal del equipo, configurada para integrar todos los componentes funcionales en una sola unidad. Este armazón vertical define los tres niveles de carga donde se deslizarán las charolas de productos, garantizando una alineación precisa y una distribución uniforme del espacio de secado como se observa en la figura 3. Además de organizar el área de procesamiento, el esqueleto sirve como bastidor rígido para el montaje de la carcasa de lámina galvanizada, proporcionando los puntos de anclaje necesarios para sellar el sistema y permitiendo que la estructura soporte el peso operativo mientras mantiene la estabilidad de la cámara de combustión en la base.

4.2.6 Cotas de medidas

La figura 4 establece los límites espaciales para integrar una cubierta que resguarde el sistema de corrientes transversales sin comprometer su funcionalidad. Al definir el volumen del cuerpo principal, se facilita un cerramiento que desvíe el viento para que no impacte la salida de humos ni altere el flujo térmico interno. Esta configuración permite que la chimenea opere aislada de turbulencias externas, manteniendo la estabilidad del proceso mientras el aire circula únicamente por el exterior de la armadura.

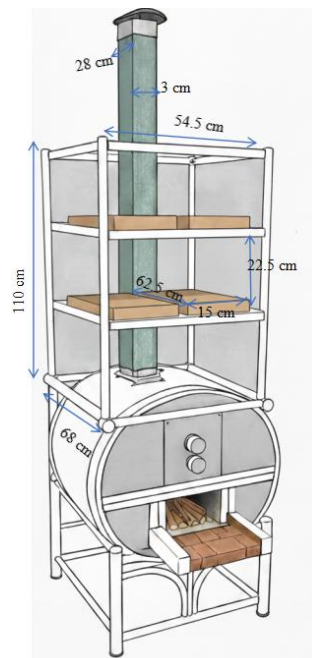


Figura 4. Cotas de medida del dispositivo propuesto. Fuente: Propia

4.2.7 Modelo conceptual

Este diseño representa el modelo conceptual para la construcción del prototipo, integrando una arquitectura de secado por transferencia indirecta que separa el área de combustión del área de proceso. En la figura 5 se aprecia cómo la unidad de potencia, basada en una cámara de biomasa, alimenta de aire limpio al gabinete principal, el cual está proyectado para maximizar el

aprovechamiento del espacio mediante un sistema de bandejas modulares y una carcasa diseñada para minimizar las pérdidas térmicas.



Figura 5. Modelo conceptual. Fuente: Propia.

4.2.8 Descripción del prototipo final y componentes integrados

En la figura 6 se observa la unidad operativa integrada por el bastidor blanco con una carcasa de lámina galvanizada, creando una cámara hermética que aprovecha el calor residual de la chimenea. El diseño incluye una puerta frontal para el control térmico y charolas escalonadas que facilitan la circulación de aire limpio por convección natural. Esta configuración garantiza un secado indirecto higiénico, protegiendo el alimento de contaminantes y gases de combustión en un sistema robusto y modular.

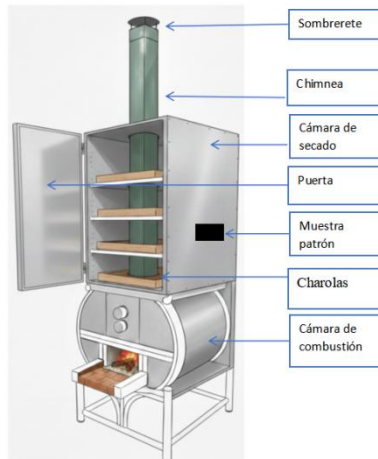


Figura 6. Descripción del Prototipo. Fuente: Propia.

4.2.9 Prototipo real

El prototipo real observado en la figura 7 presenta la estructura integrada con carcasa de lámina galvanizada, logrando un acabado robusto que actúa como una barrera física contra las corrientes de aire frío del entorno. Esta configuración permite contener el calor en el interior de la cámara, evitando su disipación hacia el ambiente. La versión final cuenta con una puerta frontal de acceso para la gestión de las charolas interiores.



Figura 7. El prototipo real. Fuente: Propia.

4.3. Evaluación y desempeño de la propuesta tecnológica

4.3.1 . Dinámica térmica y de humedad en vacío

La figura 8 ilustra el sistema de monitoreo implementado para validar el flujo térmico interno, donde se utilizan sensores de temperatura y humedad estratégicamente ubicados en cada nivel de charolas. Estos dispositivos están conectados a un módulo de adquisición de datos (Data Logger) que permite registrar las variaciones en tiempo real dentro de la cámara. Este montaje es fundamental para asegurar que el calor generado por la biomasa se distribuya uniformemente.

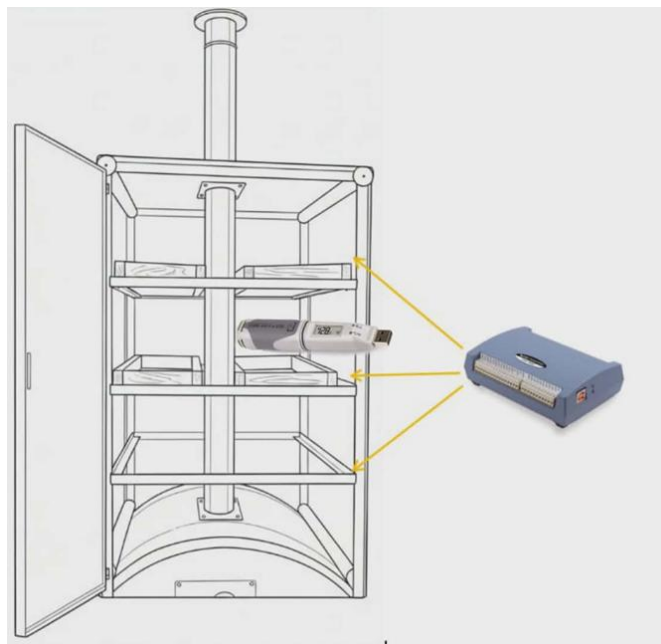


Figura 8. Posicionamiento de los sensores. Fuente: Propia.

Temperatura en tres niveles (Gradiente Térmico)

La figura 9 muestra la estratificación térmica natural, la diferencia entre niveles se mantiene dentro de un rango controlado de 5 °C a 10 °C entre cada nivel. Este comportamiento indica una distribución térmica relativamente uniforme entre charolas, favoreciendo un secado homogéneo

sin necesidad de rotación frecuente. La proximidad entre las curvas sugiere un régimen estable de convección natural y una transferencia de calor adecuada desde la chimenea hacia el interior del gabinete.

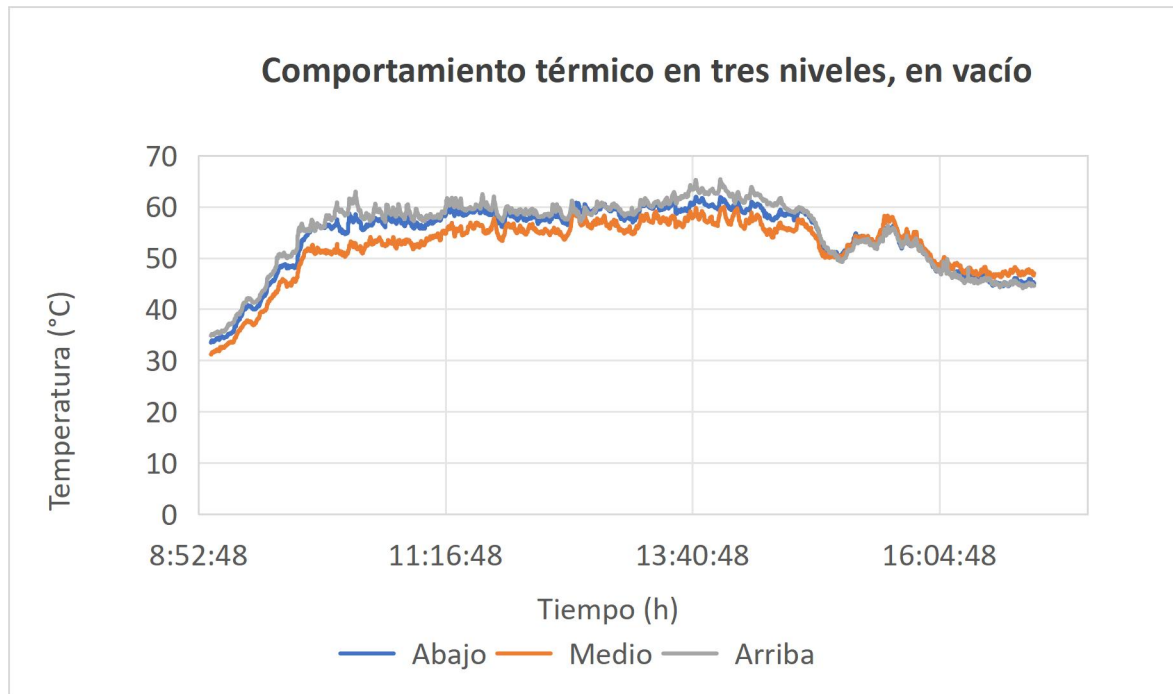


Figura 9. Temperatura en tres niveles (Gradiente Térmico). Fuente: Propia.

La figura 10 ilustra las condiciones térmicas en vacío. El prototipo demuestra capacidad de ganancia térmica y logra alcanzar temperaturas interiores superiores a los 65 °C, mientras que la temperatura ambiente se mantiene estable cerca de los 30 °C. Este diferencial térmico de 35 °C indica que el intercambiador de calor residual es efectivo cuando no existe una carga que demande calor latente de evaporación. La curva muestra una meseta de estabilidad entre las 11:00 y las 16:00 horas.

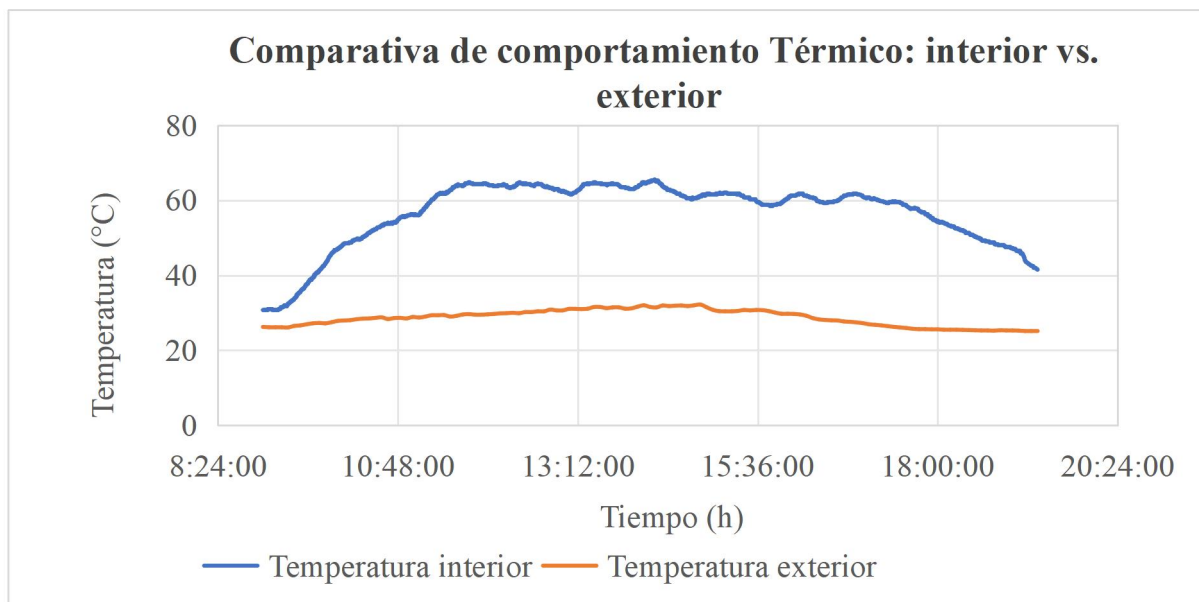


Figura 10. Dinámica térmica en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.

La figura 11 ilustra la capacidad de deshumidificación del aire dentro de la cámara. Al elevarse la temperatura en ausencia de una carga que aporte vapor de agua, la humedad relativa interior desciende drásticamente hasta alcanzar un mínimo cercano al 20%, mientras que la humedad exterior se mantiene por encima del 50%. Este resultado es fundamental, ya que demuestra que el equipo tiene la capacidad técnica de generar un ambiente con un alto potencial de secado.

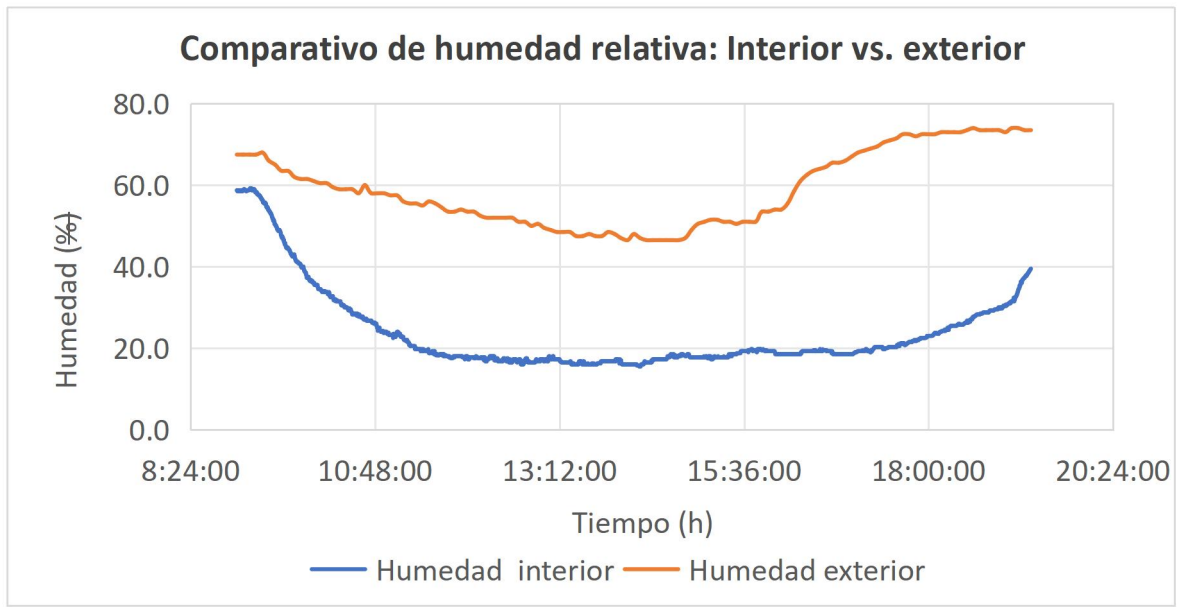


Figura 11. Dinámica de humedad en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.

La figura 12 presenta una relación inversa ideal donde el aumento de la temperatura interior provoca una caída proporcional y simétrica de la humedad relativa. La ausencia de fluctuaciones bruscas en las curvas indica un comportamiento termodinámico estable dentro del equipo. El hecho de alcanzar el punto de cruce donde la humedad es mínima 20% y la temperatura máxima 65 °C indica un comportamiento termodinámico estable del sistema.

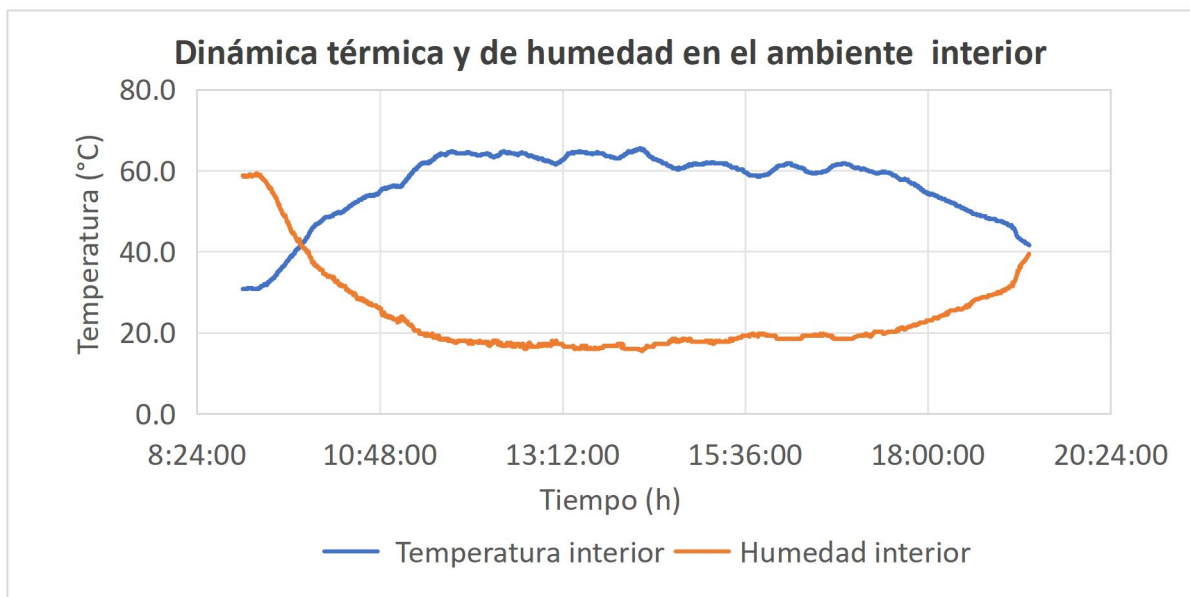


Figura 12. Dinámica térmica y de humedad en el ambiente interior. Fuente: Propia.

Dinámica térmica y de humedad en el ambiente exterior

La figura 13 muestra el comportamiento típico de las variables atmosféricas registradas por una estación meteorológica, evidenciando la oscilación térmica natural del ambiente y su efecto directo en el aire. El proceso comienza con una humedad relativa del 70 % y una temperatura moderada de 25 °C; sin embargo, al aumentar la radiación solar y alcanzar el pico máximo de temperatura de 32 °C, la humedad descende hasta su punto más bajo del 50 %, cumpliendo con la ley física de que a mayor temperatura, el aire aumenta su capacidad de retener vapor y reduce su humedad relativa. Finalmente, al disminuir la intensidad del sol y enfriarse el ambiente, la temperatura regresa a los 25 °C, provocando que la humedad se recupere e incluso suba por encima del nivel inicial, lo que demuestra la fluctuación cíclica característica de un entorno exterior sin intervención de fuentes de calor artificiales.

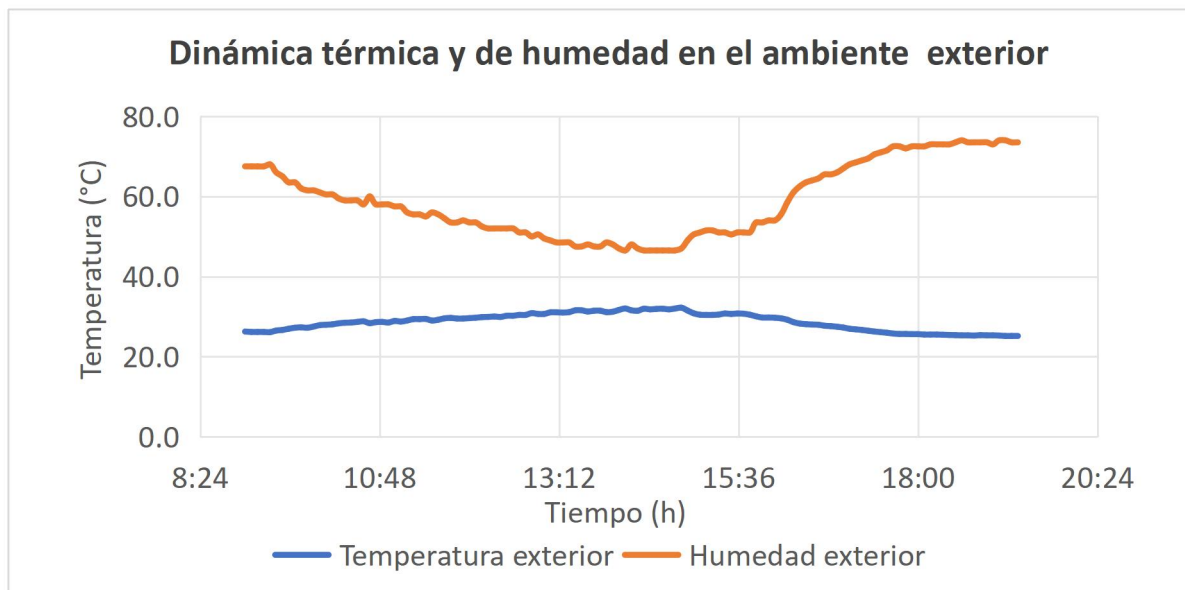


Figura 13. Dinámica térmica y de humedad en el ambiente exterior. Fuente: Propia.

4.3.2 Dinámica térmica y de humedad con carga

Criterios para la selección del objeto de estudio

La elección del plátano (*Musa paradisiaca*) como objeto de estudio responde a su relevancia estratégica en el sector agroindustrial de Chiapas. Actualmente, el plátano se posiciona dentro del Top 4 de los cultivos con mayor volumen de producción en el estado, según datos del SIAP (2023), compartiendo importancia con cultivos pilares como el maíz grano, la caña de azúcar y el café cereza.

Dinámica térmica en el ambiente interior y exterior

Temperatura en tres niveles (Gradiente Térmico)

La figura 14 muestra que la diferencia entre niveles se mantiene generalmente dentro de un rango cercano a 3–6 °C, lo que sugiere una distribución térmica uniforme aun con carga de fruta, favoreciendo condiciones de secado homogéneas dentro del gabinete.

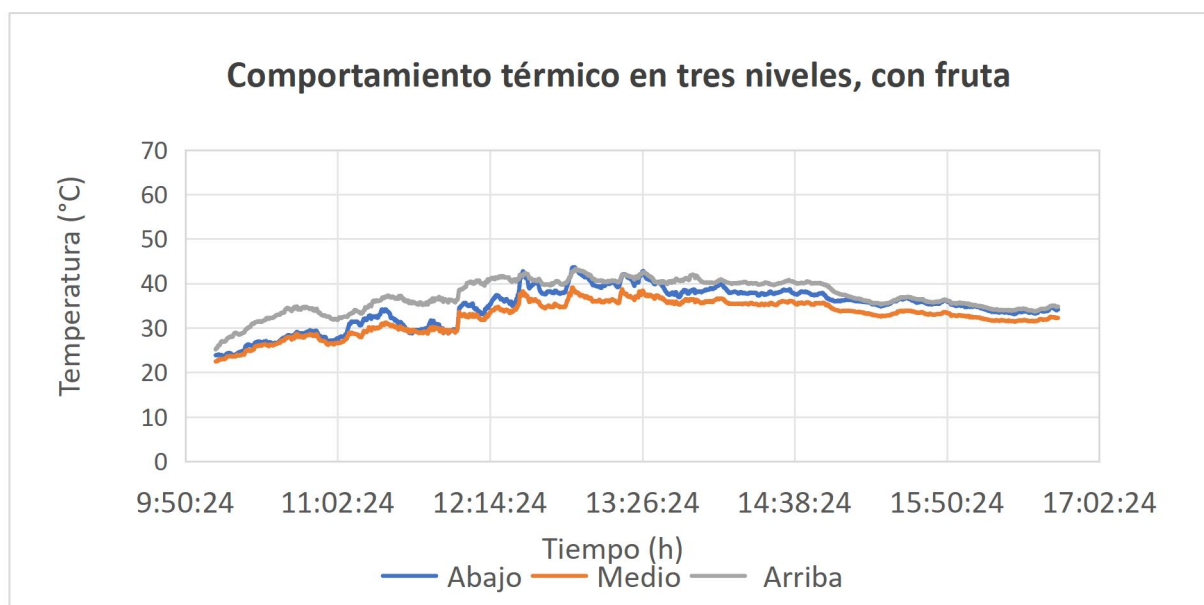


Figura 14. Comportamiento térmico entre niveles, con fruta. Fuente: Propia.

En la figura 15 se observa un aprovechamiento térmico positivo, donde el sistema logra elevar la temperatura del aire de secado por encima de la temperatura ambiente de manera constante. Mientras el ambiente se mantiene estable en torno a los 25.5 °C, el interior del secador alcanza picos de 36 °C. Este diferencial de 10.5 °C valida el uso del calor residual de la chimenea como fuente de energía. No obstante, la curva muestra una respuesta inmediata a las variaciones externas.

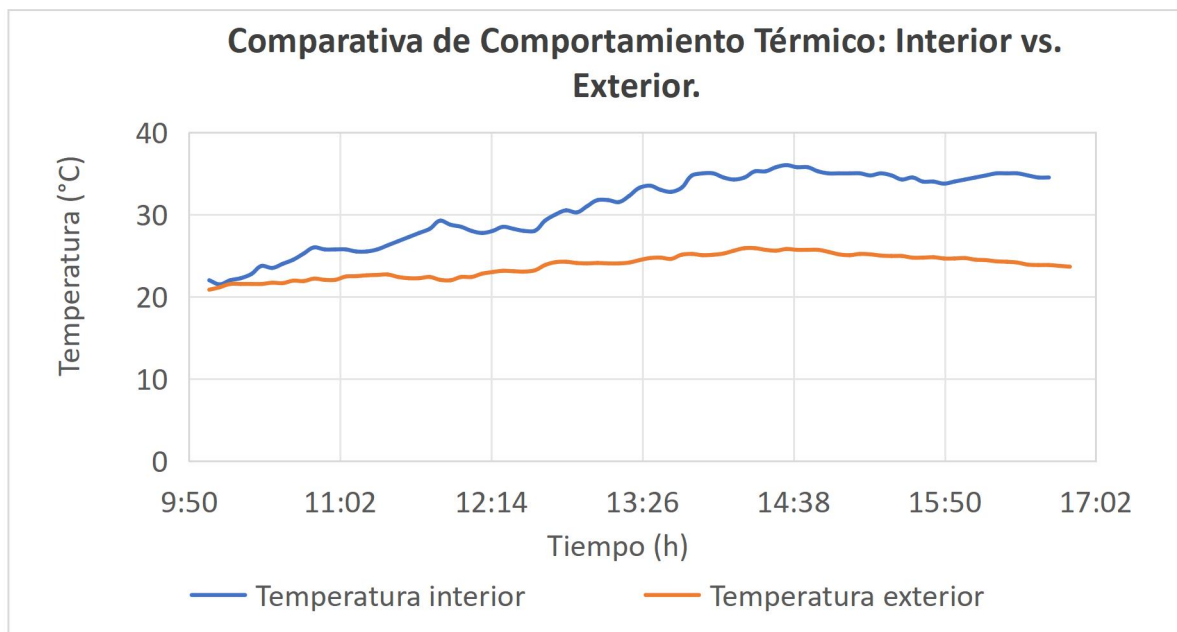


Figura 15. Dinámica térmica en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.

Dinámica de humedad en el ambiente interior y exterior

La figura 16 muestra el fenómeno de transferencia de masa. Al inicio del proceso, la humedad interior es superior a la exterior 70% vs 67%, lo que indica la evaporación del "agua libre" del plátano que satura inicialmente la cámara. A partir de las 12:14 p.m., ocurre un "punto de cruce" donde la humedad interior cae por debajo de la ambiental, estabilizándose en un 45%. Este descenso es crucial, pero el hecho de que no baje del 40% explica por qué el producto se estancó

en un contenido de humedad final elevado (30%), ya que el aire aún posee una humedad relativa considerable para permitir una desorción profunda.

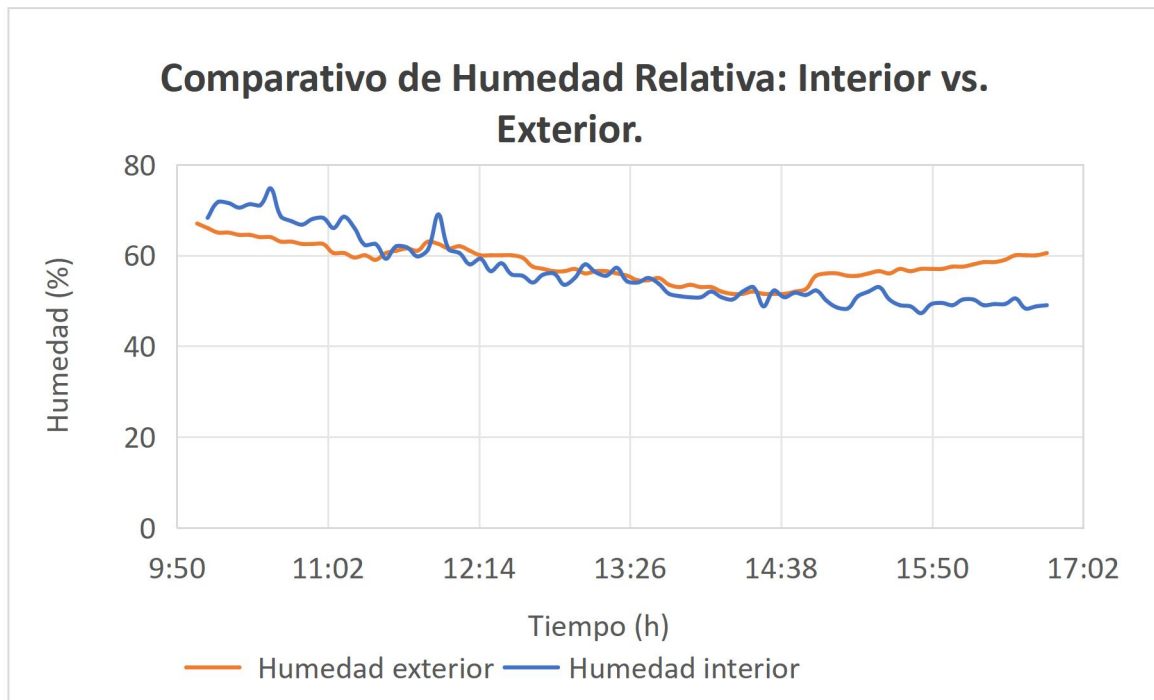


Figura 16. . Dinámica de humedad en el ambiente interior y exterior. Fuente: Propia.

Dinámica térmica y de humedad en el ambiente interior

La figura 17 muestra cómo cambian la temperatura y la humedad en el interior a lo largo del día, desde aproximadamente las 9:50 a.m hasta las 17:00. p.m. La temperatura inicia cerca de 22 °C y aumenta de manera gradual hasta alcanzar alrededor de 35 °C, manteniéndose después casi estable con pequeñas variaciones. Por otro lado, la humedad comienza cerca del 70 % y va disminuyendo progresivamente hasta aproximarse al 50 %, también con ligeros cambios. En general, se observa que mientras la temperatura sube, la humedad baja.

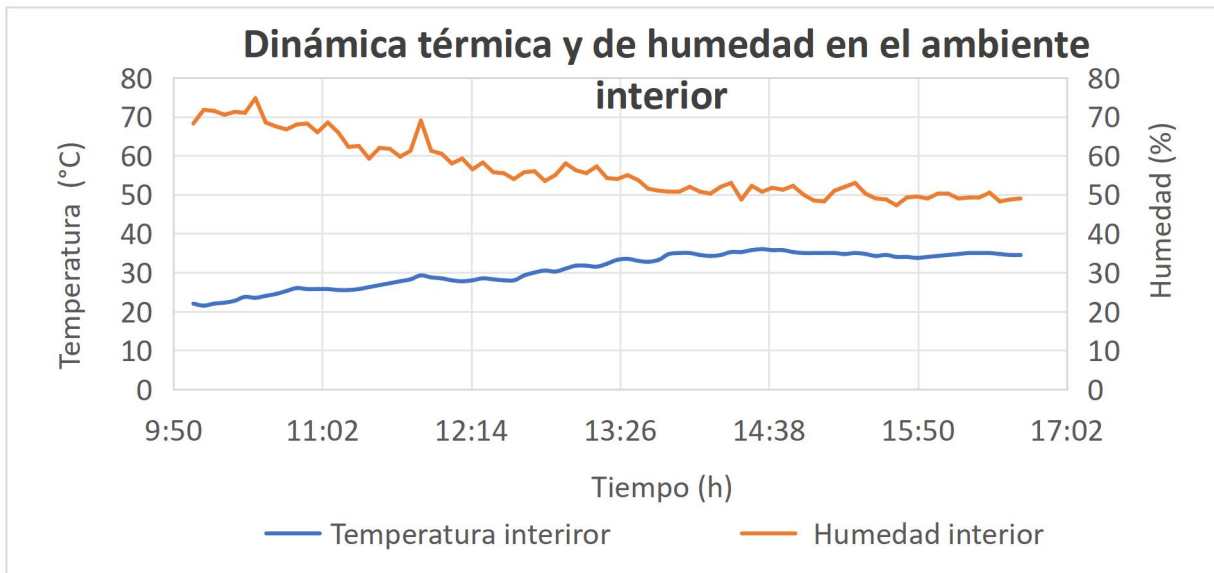


Figura 17. Dinámica térmica y de humedad en el ambiente interior. Fuente: Propia.

La figura 18 documenta las condiciones ambientales de control durante la experimentación en Tuxtla Gutiérrez. Se observa un comportamiento típico de la región donde, a pesar del incremento en la temperatura al mediodía, la humedad relativa ambiental se mantiene por encima del 40%. Estos datos registran el entorno real bajo el cual operó el prototipo, sirviendo como línea base para contrastar las condiciones internas logradas en la cámara de secado.

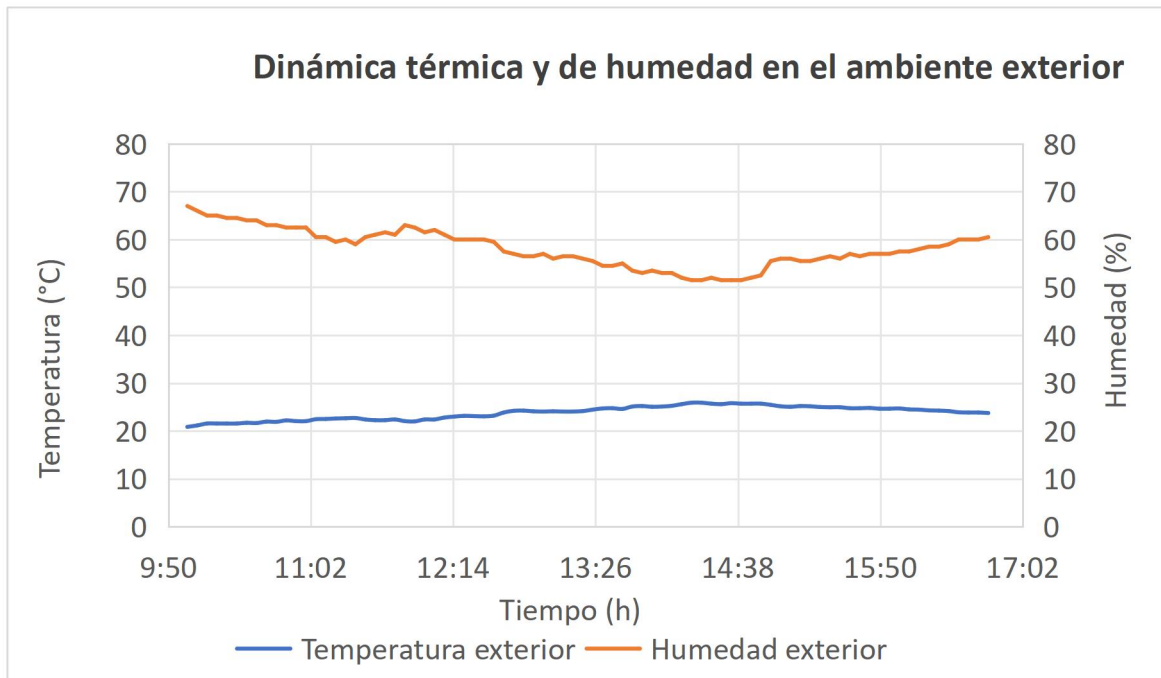


Figura 18. Dinámica térmica y de humedad en el ambiente exterior. Fuente: Propia.

4.3.3 Procedimiento del desempeño térmico y de remoción de masa

(Paso 1: Selección de producto agrícola) La elección del plátano (*Musa paradisiaca*) como objeto de estudio responde a su posición como el tercer cultivo de mayor producción en el estado de Chiapas, el plátano representa un desafío importante en seguridad alimentaria para el autoconsumo. Al ser un fruto con un contenido de humedad aproximado del 75 %, resulta el modelo ideal para validar la presente investigación para determinar la capacidad de remoción de agua de un sistema modular de uso de calor residual de la chimenea de una estufa ecológica.

(Paso 2: Registro de masa inicial m_i)

La figura 19 presenta la masa inicial en 2.78 gramos o 0.00278 kg a las 10:16 a.m.



Figura 19. Masa inicial. Fuente: Propia.

(Paso 3: Secado en prototipo)

La figura 20 presenta, el secado en el prototipo.



Figura 20. Secado en prototipo. Fuente: Propia.

(Paso 4: Registro periódico de la masa)

La figura 21 presenta la disminución de masa de agua registrados cada 30 minutos.

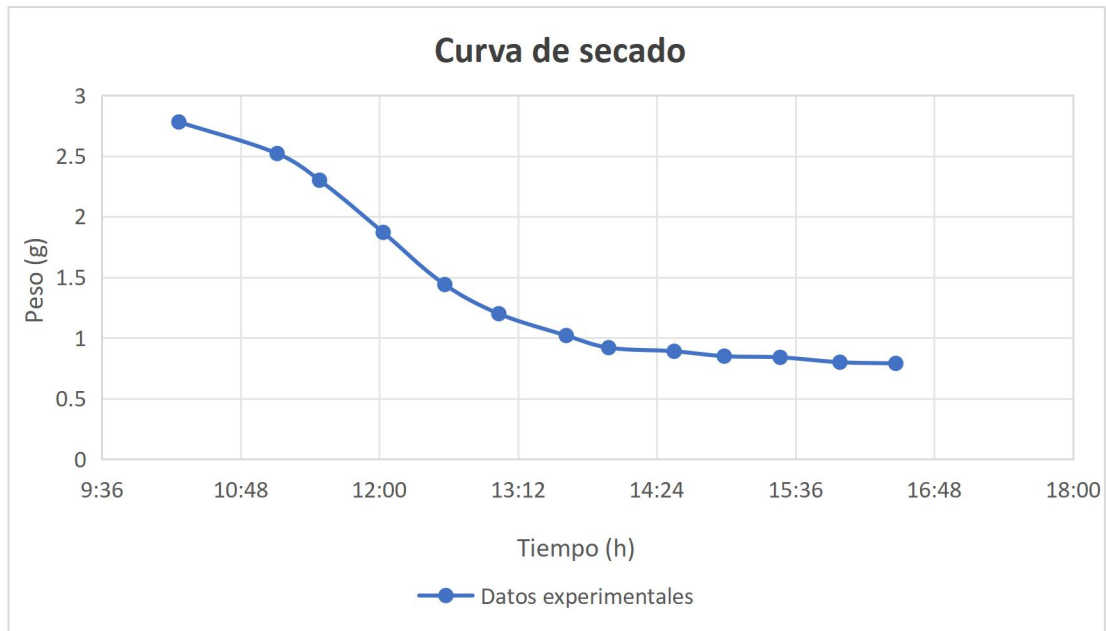


Figura 21. Curva de secado. Fuente: Propia.

(Paso 5: Determinar peso final de la masa m_f)

La figura 22 presenta la disminución de la masa hasta 0.79 gramos o 0.00079 kg a las 16:28 o 4:28 p.m.



Figura 22. Masa final. Fuente: Propia.

(Paso 6: Cálculo de humedad removida), utilizando la ecuación 2)

$$2.78 \text{ g} - 0.79 \text{ g} = 1.99 \text{ g}$$

$$(1.99 \text{ g} / 2.78 \text{ g}) * 100 = 71.58 \%$$

(Paso 7: Cálculo de velocidad y tiempo de secado), utilizando ecuación 3 y 4)

$$16.28 \text{ h} - 10.16 \text{ h} = 6.12 \text{ h}$$

$$(0.00199 \text{ Kg} / 6.12 \text{ h}) = 0.000325 \text{ Kg} / \text{h}$$

$$0.000325 \text{ Kg} / \text{h} = 0.325 \text{ g/h}$$

(Paso 8: Cálculo de energía evaporada, utilizando ecuación 5)

$$0.00199 \text{ Kg} * 2400 \text{ kJ} / \text{Kg} = 4.77 \text{ kJ}$$

5. Análisis y discusión de resultados

Se comprobó que el calor residual de las chimeneas en estufas ecológicas constituye una fuente de energía viable y disponible para procesos de deshidratación. Los resultados validan el diseño

modular propuesto como un intercambiador de calor funcional que no interfiere con la operación de cocción. El prototipo demostró capacidad técnica para reducir el contenido de humedad del plátano (*Musa paradisiaca*) de aproximadamente 75 % a 30 % en un periodo de 6.12 horas, manteniendo un proceso de secado estable a pesar de las limitaciones impuestas por la humedad relativa ambiental.

5.1. Interpretación del potencial térmico

El gradiente térmico de 57.2 °C registrado entre la base y la salida de la chimenea evidencia la existencia de una cantidad significativa de energía térmica residual susceptible de ser aprovechada. La temperatura de 77.3 °C medida en la base del ducto confirma que una fracción considerable del calor generado durante la combustión se disipa hacia el ambiente a través de la chimenea. Este comportamiento demuestra que la chimenea no funciona únicamente como un conducto de evacuación de gases, sino también como una superficie potencial de transferencia de calor. En este sentido, el diferencial térmico obtenido indica que existe disponibilidad energética suficiente para considerar su aprovechamiento en aplicaciones térmicas complementarias.

5.2. Evaluación del diseño y operatividad del prototipo

El prototipo fue construido con una carcasa de lámina galvanizada y una estructura portante que permite integrarlo alrededor de la chimenea de la estufa. Durante la fase de evaluación estructural se verificó que el sistema mantiene estabilidad mecánica y no interfiere con la evacuación de gases de combustión. La configuración anular alrededor del ducto permite establecer una zona de intercambio térmico sin modificar el funcionamiento de la estufa. Asimismo, el diseño modular facilita el acceso a las charolas y el manejo del sistema durante su operación. En conjunto, estas características demuestran que el dispositivo presenta un funcionamiento adecuado y una integración compatible con el sistema de combustión existente.

5.3. Discusión del proceso de secado y comparativa

La comparación entre las pruebas en vacío y las realizadas con carga de producto permite observar el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones reales de operación. Mientras

que en vacío el prototipo alcanzó temperaturas cercanas a 65 °C, durante el proceso con producto la temperatura promedio se redujo a aproximadamente 36 °C, debido al consumo de energía requerido para la evaporación del agua contenida en el plátano (*Musa paradisiaca*). A pesar de esta disminución térmica, el sistema logró reducir el contenido de humedad del fruto de 75 % a 30 % en un periodo de 6.12 horas. El estancamiento cercano al 30 % se atribuye principalmente a la elevada humedad relativa ambiental registrada durante el experimento. En comparación con el secado solar tradicional, el sistema ofrece un entorno más controlado y protegido para el procesamiento del producto.

Recomendaciones o áreas de oportunidad

Garantizar hermeticidad: Es imperativo asegurar un sellado total en las uniones entre la chimenea y el módulo para evitar la infiltración de humo, asegurando que el proceso se mantenga 100 % indirecto e inocuo.

Rediseño de la cámara de combustión: Incrementar la longitud de la cámara de combustión (fogón) para confinar la llama y evitar la pérdida de calor por la boca de la estufa, maximizando la transferencia hacia el ducto.

Implementación de aislamiento térmico: Revestir la carcasa externa del secador con material aislante (lana mineral o fibra de vidrio) para minimizar las pérdidas de calor hacia el ambiente y estabilizar la temperatura interna.

Optimización dimensional: Realizar un dimensionamiento específico del volumen de la cámara de secado para cada modelo de estufa, asegurando que el área de transferencia sea proporcional a la capacidad térmica residual de la chimenea.

Integración de ventilación forzada: Evaluar la inclusión de un ventilador termoeléctrico (módulo Seebeck) para forzar el flujo de aire, rompiendo la capa límite de humedad en la fruta y acelerando la cinética de secado.

Referencias Bibliográficas

Cayo-Colca, I. S., Castro-Yana, D., De la Cruz-Cabrera, K. J., & Morales-Mendoza, R. K. (2021). Características fisicoquímicas, funcionales y estructurales de harinas de variedades de plátano (*Musa paradisiaca* L.) cultivadas en Perú. *Nutrición Hospitalaria*, 38(5), 1021-1029.

Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., & Borgemeister, C. (2015). Unpacking Postharvest Losses in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *World Development*, 66, 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.08.002>

Akbari, A., Kouravand, S., & Chegini, G. (2018). Experimental analysis of a rotary heat exchanger for waste heat recovery from the exhaust gas of dryer. *Applied Thermal Engineering*, 138, 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.103>

Bhattacharya, S. C. (2015). Wood energy in India: Status and prospects. *Energy*, 85, 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.043>

Champier, D., Bedecarrats, J. P., Rivaletto, M., & Strub, F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.015>

Collins, F. (2019). *DESARROLLO DE UNA ESTUFA ECOLÓGICA MULTIFUNCIONAL LEÑA-BIOGÁS* [Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/720>

Esper, A., & Mühlbauer, W. (1998a). Solar drying—An effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15(1–4), 95–100. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8)

Esper, A., & Mühlbauer, W. (1998b). Solar drying—An effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15(1–4), 95–100. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8)

Fellows, P. (2017). *Food processing technology: Principles and practice* (Fourth edition). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100522-4.00004-3>

Gustavsson, J. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention : study conducted for the International Congress “Save Food!” at Interpack 2011 Düsseldorf, Germany*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

HLPE. (2014). *Food losses and waste in the context of sustainable food systems*. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security.

Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environmental Science & Technology*, 46(19), 10827–10834. <https://doi.org/10.1021/es301693f>

Kader, A. A. (2005). INCREASING FOOD AVAILABILITY BY REDUCING POSTHARVEST LOSSES OF FRESH PRODUCE. *Acta Horticulturae*, 682, 2169–2176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.296>

Killander, A., & Bass, J. C. (1996). A stove-top generator for cold areas. *Fifteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings ICT '96*, 390–393. <https://doi.org/10.1109/ICT.1996.553511>

Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering*, 121, 48–57.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>

Medrano, L. (2016). *Diseño, construcción y evaluación de un generador termoeléctrico acoplado a una estufa ecológica*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Gutiérrez, M. S. (2024). *Construcción y evaluación de un secador híbrido solar-biomásico* [Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas].

Mehetre, S. A., Panwar, N. L., Sharma, D., & Kumar, H. (2017). Improved biomass cookstoves for sustainable development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.150>

Mujumdar, A. S. (Ed.). (2006a). *Handbook of Industrial Drying* (0 ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420017618>

Mujumdar, A. S. (Ed.). (2006b). *Handbook of Industrial Drying* (0 ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420017618>

Mujumdar, A. S., & Law, C. L. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 843–852.
<https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>

Nuwayhid, R. Y., & Hamade, R. (2005). Design and testing of a locally made loop-type thermosyphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators. *Renewable Energy*, 30(7), 1101–1116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.008>

Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>

Raman, P., Ram, N. K., & Gupta, R. (2014). Development, design and performance analysis of a forced draft clean combustion cookstove powered by a thermo electric generator with multi-utility options. *Energy*, 69, 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.077>

Raman, P., Ram, N. K., & Murali, J. (2014). Improved test method for evaluation of bio-mass cook-stoves. *Energy*, 71, 479–495. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.101>

Anexos

Los equipos de medición que se usaron para las pruebas son los siguientes,

tomando en cuenta su margen de error.

Equipo y/o sensor	Margen de error y rango	Imagen
Datalogger Measurement Computing USB TEMP-AI	De 0 °C a 100 °C: ± 0.38 °C (máx), ± 0.11 °C (típico). Y de 100 °C a 300 °C: ± 0.39 °C (máx), ± 0.12 °C (típico). Termopares tipo K De -40 °C a 1000 °C: ± 2.5 °C o ± 0.0075 * (t). y De 1000 °C a 1200 °C: ± 2.5 °C o ± 0.0075 * (t).	
Registradores de temperatura y humedad del modelo USB-502-LCD	± 0.5 °C en el rango de -20 °C a 50 °C y ± 1 °C fuera de este rango y $\pm 3\%$ HR en el rango de 20% a 80% HR y $\pm 5\%$ HR fuera de este rango	

Báscula SF-400C	desde 0,01 g hasta 600 g.	
Báscula Porcionadora Torrey Leq-5 Acero Inoxidable 5 Kg. Display Backlight 0Leq5-N	Capacidad: 5 kg. división mínima 0.001 kg / 10 lb. división mínima 0.002 lb.	
Medidor Digital De Humedad Wm700 Wood Hange Mestek Pin 2	Error 1~75%±5% Rango de medición de madera 1~75% Humedad relativa de entorno de uso: 0-85%	