

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**OPTIMIZACIÓN DE EQUIPOS TÉRMICOS Y TERMODINÁMICOS
CON ENFOQUE MECATRÓNICO**

**OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN SECADORES
SOLARES DE MEDIANA CAPACIDAD, QUE UTILICEN
MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCMS) Y REFLECTORES
FOTÓNICOS.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

FRANKLIN MIGUEL QUILO LECHON

franklin.quilo@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, FRANKLIN MIGUEL QUILO LECHON declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



FRANKLIN MIGUEL QUILO LECHON

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por FRANKLIN MIGUEL QUILO LECHON, bajo mi supervisión.



DR. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



FRANKLIN MIGUEL QUILO LECHON



DR. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Siempre agradecido primero con Dios, por las oportunidades que me ha brindado y las lecciones que he recibido, agradecido con mis padres Juana y Miguel por su inagotable paciencia, y que día a día solventaron los recursos necesarios para conseguir este objetivo; también debo mencionar, mi gratitud con la Comunidad Politécnica, por su aporte en mi formación académica, al Ing. Álvaro Aguinaga por su comprensión y seguimiento a mi proyecto. De igual manera, extendiendo mi gratitud y colaboración a las todas las personas que formaron parte de mi crecimiento personal durante esta etapa académica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	4
1.4.1 Los cereales en el Ecuador: Trigo y Cebada.....	4
1.4.2 Secadores solares	6
1.4.2.1 Secador solar de convección natural (secador pasivo).....	7
1.4.2.2 Secador solar de convección forzada (secador activo).....	8
1.4.2.3 Secador solar híbrido	8
1.4.2.4 Selección del secador solar.....	10
1.4.3 Materiales de cambio de fase (PCMs).....	11
1.4.3.1 Orgánicos.....	12
1.4.3.2 Inorgánicos	12
1.4.3.3 Eutécticos	14
1.4.3.4 Selección del material PCM	14
1.4.4 Reflectores fotónicos.....	16
2 METODOLOGÍA.....	17
2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	17
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO A CONTROLAR.....	19
2.3 ANÁLISIS TERMODINÁMICO	19
2.3.1 Primera ley de la termodinámica: Eficiencia	20
2.3.1.1 Cámara de secado.....	20
2.3.1.2 PCM.....	21
2.3.1.3 Colectores solares: reflectores fotónicos.....	22
2.3.1.4 Eficiencia térmica.....	23

2.3.2	Segunda ley de la termodinámica: Exergía	24
2.4	ESPACIO DE ESTADO.....	25
2.4.1	Sistema térmico/termodinámico cerrado	26
2.4.2	Mecanismos de transferencia de calor	27
2.4.2.1	Conducción	27
2.4.2.2	Convección	28
2.4.2.3	Radiación.....	28
2.4.2.4	Coeficiente global de transferencia de calor.....	28
2.5	MODELO LINEALIZADO.....	29
2.5.1	Suposiciones.....	29
2.5.2	Representación en espacio de estados.....	29
2.6	MODELO EXPERIMENTAL	30
2.6.1	Procedimiento de experimentación	31
2.7	SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	31
2.7.1	Valores ingresados.....	32
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	33
3.1	RESULTADOS	33
3.1.1	Etapa de Calentamiento: Control lazo abierto	33
3.1.2	Etapa de Enfriamiento.....	34
3.1.3	Validación: Curva de enfriamiento.....	34
3.1.4	Análisis de sensibilidad	35
3.1.4.1	Dimensiones de la cámara.....	35
3.1.4.2	Aislamiento de paredes.....	36
3.1.4.3	Cantidad de Parafina	37
3.1.5	Parámetros optimizados.....	38
3.2	CONCLUSIONES.....	39
3.3	RECOMENDACIONES	40
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
5	ANEXOS.....	46
	ANEXO I. CÓDIGO MATLAB.....	46
	ANEXO II. FABRICACIÓN DEL SECADOR SOLAR DIRECTO DE CONVECCIÓN NATURAL.....	48
	ANEXO II. MULTÍMETRO DIGITAL: CARACTERÍSTICAS	49
	ANEXO IV. PLANO GENERAL DEL SECADOR SOLAR DIRECTO DE CONVECCIÓN NATURAL. ...	50

RESUMEN

La investigación busca optimizar la eficiencia térmica en secadores solares que utilicen materiales de cambio de fase (PCMs) y reflectores fotónicos para la deshidratación sustentable de productos agrícolas en la región interandina del Ecuador. En el primer capítulo se expone la situación actual del trigo y la cebada. Luego, se expone la tipología de los secadores solares y los PCMs, y de los reflectores fotónicos se explica la incidencia en el proceso de secado. En el segundo capítulo, utilizando la representación matemática del proceso en espacio de estados se relaciona la potencia requerida con la temperatura en la cámara de secado.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de las simulaciones en MATLAB y análisis de sensibilidad. Se requiere de 76 W para alcanzar y mantener la cámara de secado a la temperatura de 56°C en 4 horas, y posteriormente se debe suministrar 40 W adicionales durante 2 horas para la fusión del PCM. Para la validación del modelo matemático se utiliza un modelo experimental el cual implementa una resistencia eléctrica que simula la energía solar requerida; que durante la etapa de enfriamiento, la temperatura de la cámara del secador solar ordinario sin PCM rápidamente desciende de 56°C a 24°C en 15 minutos; mientras que, el secador solar con PCM desciende en 4 horas, por lo que, implementar PCMs en el secador solar optimiza la eficiencia térmica del secador cuando ya no se dispone de energía solar. Finalmente, se presentan los valores óptimos de los parámetros operacionales definidos.

PALABRAS CLAVE: Trigo y cebada, secador solar, PCMs, reflectores fotónicos, eficiencia.

ABSTRACT

The research seeks to optimize thermal efficiency in solar dryers that use phase change materials (PCMs) and photonic reflectors for the sustainable dehydration of agricultural products in the inter-Andean region of Ecuador. In the first chapter the current situation of wheat and barley is exposed. Then, the typology of solar dryers and PCMs is exposed, and the incidence of photonic reflectors in the drying process is explained. In the second chapter, using the mathematical representation of the process in state space, the required power is related to the temperature in the drying chamber.

In the third chapter the results of the simulations in MATLAB and sensitivity analysis are presented. 76 W is required to reach and maintain the drying chamber at a temperature of 56°C in 4 hours, and then an additional 40 W must be supplied for 2 hours for PCM melting. For the validation of the mathematical model, an experimental model is used which implements an electrical resistance that simulates the required solar energy; that during the cooling stage, the temperature of the ordinary solar dryer chamber without PCM rapidly drops from 56°C to 24°C in 15 minutes; while, the solar dryer with PCM decreases in 4 hours, therefore, implementing PCMs in the solar dryer optimizes the thermal efficiency of the dryer when solar energy is no longer available. Finally, the optimal values of the defined operational parameters are presented.

KEYWORDS: Wheat and barley, solar dryer, PCMs, photonic reflectors, efficiency.

1 INTRODUCCIÓN

El Ecuador dispone de reservas de energía no renovable, que a su vez la extracción de estas reservas afecta gravemente el ecosistema. Una de las reservas que se disponen, son los yacimientos de petróleo en el oriente ecuatoriano, que por ahora la extracción de este recurso energético es el actor predominante dentro de la matriz energética en el país; sin embargo, la disponibilidad de este recurso es limitada (Espinoza et al., 2019), y sobre todo el consumo ineficiente de los combustibles fósiles ha potenciado el efecto de invernadero. El país debe iniciar un cambio de la matriz energética, proyectándose hacia el uso de energías renovables (Ponce et al., 2018).

El sector agrícola es uno de los principales dependientes de combustibles fósiles en el país; por lo que, es prioritario intervenir en sus procesos de producción mediante la inserción de tecnologías verdes con el propósito de mejorar y optimizar los procesos de producción (Golla & Gerke, 2018); permitiendo así, hacer competitivos los productos agrícolas ecuatorianos. Para controlar los efectos adversos del ambiente sobre la temperatura y humedad de los productos agrícolas, se disponen de secadores que preservan los productos; secadores que requieren grandes cantidades de energía, la cual se puede obtener de quemar combustibles fósiles, o captando y almacenando la energía solar. Considerando lo perjudicial que tiene el uso de combustibles fósiles, se utilizan secadores que emplean la energía solar para calentar el aire circundante y deshidratar el producto agrícola (Prakash & Kumar, 2020).

La eficiencia energética de los secadores solares está limitada por la captación de energía; en donde la radiación del sol no es recibida y captada eficientemente por el colector solar incorporado en el secador. Por lo que, se prueba con tecnologías de reciclaje de fotones, que permiten reutilizar fotones, con el propósito de incrementar la eficiencia energética (Pathi et al., 2017) (Seng et al., 2012). La otra limitación es el almacenamiento de la energía capturada; en respuesta, se usa materiales de cambio de fase (PCMs). Encapsulando PCMs en el secador se almacena la energía térmica, permitiendo mantener estable la temperatura interna del aire durante períodos de tiempo prolongados (Shalaby et al., 2014).

Las energías renovables están llamadas a desempeñar un papel importante en la matriz energética del Ecuador en los próximos años. Las tecnologías de energía solar concentrada, termo solar y fotovoltaica son opciones prometedoras para abastecer una parte importante de la demanda de energía, ayudando con el reemplazo gradual de los combustibles fósiles (IEA, 2014).

El Ecuador tiene un gran potencial para implementar proyectos solares ya que casi el 75% del territorio tiene niveles de radiación solar superiores a $3,8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$, así como el 55% del territorio tiene niveles de radiación solar superiores a $4,1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$ (Ordoñez et al., 2019).

Por lo expuesto, esta investigación propone el uso de tecnologías de reciclaje de fotones para mejorar la captación de energía solar, que simultáneamente utilizando PCMs adecuados se busca incrementar el almacenamiento de energía térmica; y consecuentemente mantener la temperatura requerida en la cámara de secado por periodos de tiempo prolongados.

1.1 Objetivo general

Optimizar la eficiencia térmica en secadores solares de mediana capacidad, que utilicen materiales de cambio de fase (PCMs) y reflectores fotónicos, para la deshidratación sustentable de productos agrícolas en la región interandina del Ecuador.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información del estado del arte;
2. Caracterizar técnicamente los secadores solares de mediana capacidad, que utilicen materiales de cambio de fase (PCMs) y reflectores fotónicos.
3. Modelar matemáticamente los procesos termodinámicos y térmicos en los secadores solares de mediana capacidad caracterizados, para las condiciones ambientales de la región interandina del Ecuador;
4. Resolver el modelo matemático mediante simulación computacional, y validar con modelo experimental;
5. Desarrollar un análisis de sensibilidad paramétrica.

1.3 Alcance

Objetivo específico 1 (OE1): Recopilar información del estado del arte.

- *Actividad (A1.1):* Recopilación de la información documental.
- *Actividad (A1.2):* Análisis, evaluación y selección de la bibliografía.
- *Actividad (A1.3):* Justificación y respuesta a la pregunta de investigación inicialmente propuesta.
- *Producto (P1.1):* Estado del arte.

Objetivo específico 2 (OE2): Caracterizar técnicamente los secadores solares de mediana capacidad, que utilicen materiales de cambio de fase (PCMs) y reflectores fotónicos.

- *Actividad (A2.1):* Selección de los productos agrícolas y determinación de propiedades termo – físicas de los productos agrícolas seleccionados.
- *Actividad (A2.2):* Exposición de la tipología de los secadores solares y selección del secador solar.
- *Actividad (A2.3):* Exposición de la tipología de los PCMs y selección del PCM.
- *Actividad (A2.4):* Exposición de reflectores fotónicos e incidencia en el proceso de secado.
- *Producto (P2.1):* Producto agrícola, secador solar, y material PCM.

Objetivo específico 3 (OE3): Modelar matemáticamente los procesos termodinámicos y térmicos en los secadores solares de mediana capacidad caracterizados, para las condiciones ambientales de la región interandina del Ecuador.

- *Actividad (A3.1):* Modelación matemática de los procesos termodinámicos y térmicos en secador solar seleccionado incorporando PCMs.
- *Producto (P3.1):* Modelo matemático en espacio de estado.

Objetivo específico 4 (OE4): Resolver el modelo matemático mediante simulación computacional, y validar con modelo experimental.

- *Actividad (A4.1):* Simulación del modelo matemático.
- *Actividad (A4.2):* Validación experimental con modelo de calentamiento simple y práctico, para medir las temperaturas y tiempos de calentamiento/enfriamiento.
- *Producto (P4.1):* Modelo experimental de calentamiento.
- *Producto (P4.2):* Validación del modelo matemático.

Objetivo específico 5 (OE5): Desarrollar un análisis de sensibilidad paramétrica.

- *Actividad (A5.1):* Simulaciones variando los parámetros operacionales.
- *Producto (P5.1):* Análisis de las variaciones.
- *Producto (P5.1):* Parámetros operacionales que optimizan el secado en el secador solar seleccionado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Los cereales en el Ecuador: Trigo y Cebada

Los cereales de mayor importancia en el país son el trigo, arroz, maíz y la cebada (Garófalo et al., 2011). El país consume 450 000 Ton/año de trigo, pero solo 9 000 Ton se producen internamente, producción distribuida en la región interandina, así también el cultivo de cebada registra 48 000 ha dedicadas a la producción a nivel nacional (Holguín & Alvarado, 2017); es notable el insignificante aporte nacional frente a la demanda del trigo y la cebada razón por la cual se busca intervenir y mejorar el proceso de secado y consecuentemente la calidad de los productos que ofertan los pequeños agricultores a los molinos receptores de estos cereales.

En esta investigación se selecciona el trigo y la cebada, primero porque estos productos se dan en zonas del país en donde se tienen altos niveles de radiación solar, en la Figura 1.1 se observa que los mayores niveles de irradiación solar diaria promedio del país se tienen en toda la región interandina; segundo, porque son productos tradicionales de autoconsumo e ingreso económico de las familias residentes en las zonas de la región interandina.

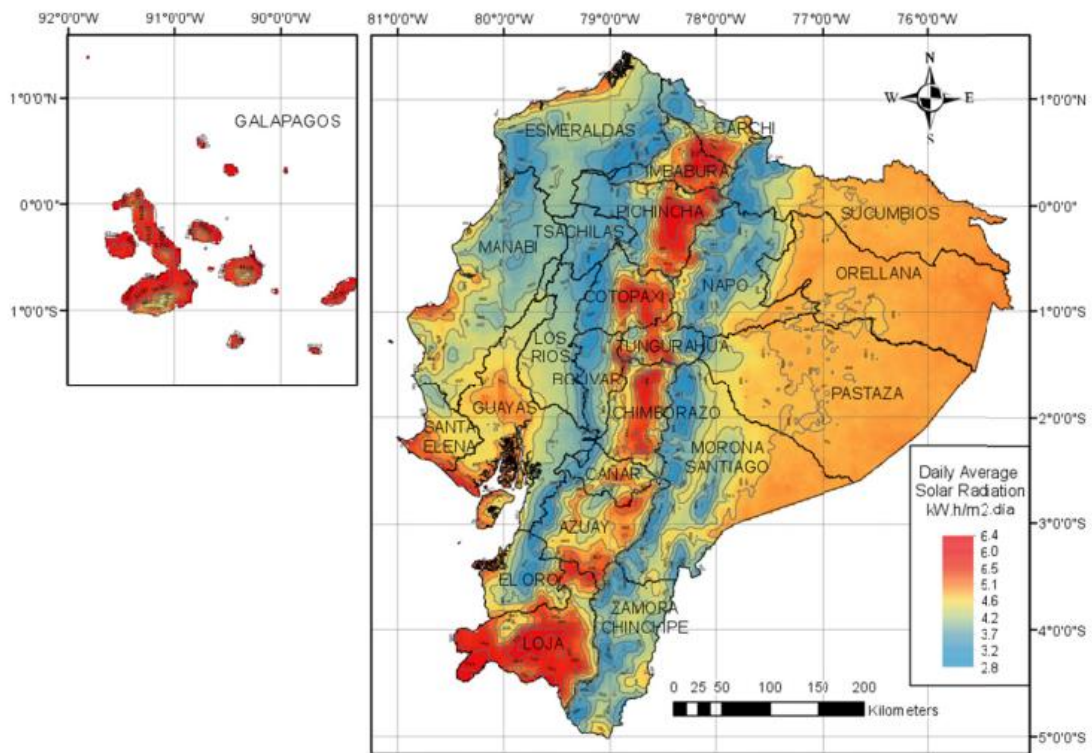


Figura 1.1. Mapa solar del Ecuador de la irradiación diaria

Fuente: (Ordoñez et al., 2019)

En la Figura 1.2 se presentan muestras de la (a) cebada, (b) trigo y (c) la forma del grano.



Figura 1.2. Cereales: (a) cebada, (b) trigo, (c) forma del grano

Fuente: (Abad, 2015)

Las condiciones ambientales y de almacenamiento que requieren estos cereales se muestran en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Condiciones requeridas para del trigo y cebada

Condiciones ambientales		
	Trigo	Cebada
Altitud (m.s.n.m.)	2 000 a 3 200	2 400 a 3 400
Clima (°C)	14 a 22	12 a 20
Humedad (%)	<13	
Almacenamiento		
Humedad (%)	<75	
Temperatura (°C)	<12	

Fuente: (INIAP, 2014)

1.4.2 Secadores solares

Para controlar los efectos adversos del ambiente sobre la temperatura y humedad de los productos agrícolas se requiere de secadores que deshidraten los granos a niveles óptimos y controlados para su almacenamiento, preservando la calidad del producto. Los secadores requieren grandes cantidades de energía, que principalmente se obtiene de quemar combustibles fósiles, considerando lo perjudicial que tiene el uso de combustibles fósiles y aprovechando los favorables niveles de radiación del país se puede también captar y almacenar la energía solar para el proceso de secado.

Investigaciones como la de Guzmán et al. (2021), implementan secadores solares forzados híbridos en agrícolas y agroindustriales en la región de Huetar Norte de Costa Rica, mejorando los procesos productivos al reducir tiempos de trabajo; así también, en la investigación de Marroquín et al. (2017), diseñan y construyen un secador solar indirecto que implementa un concentrador solar cilíndrico – parabólico, sistema que aprovecha $611\text{W}/\text{m}^2$ de la irradiación diaria en Chiapas, México.

De acuerdo al investigador Fudholi et al. (2009), en la Figura 1.3 se tiene la tipología de los secadores solares:

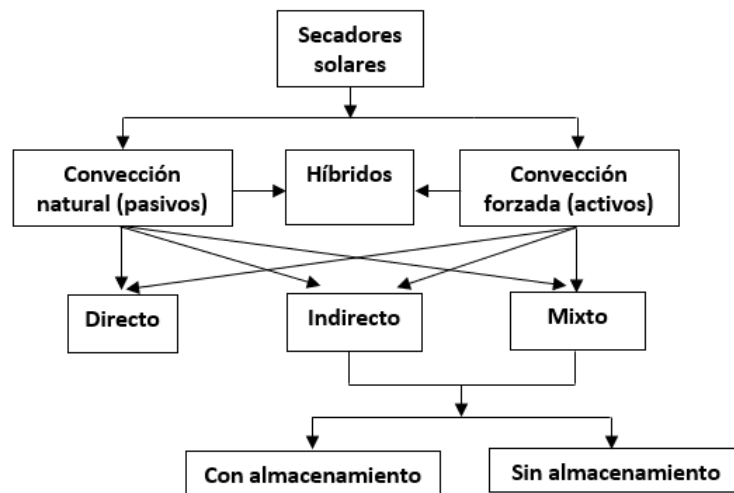


Figura 1.3. Tipología de los secadores solares

Fuente: (Fudholi et al., 2009)

1.4.2.1 Secador solar de convección natural (secador pasivo)

En este tipo de secadores el flujo de aire es inducido por fuerzas de empuje que surgen del cambio de densidad (Bergman, 2011) (Prakash & Kumar, 2021). Este secador prácticamente consiste en una caja caliente. Constructivamente, sus lados y base son fabricados en madera y metal; la superficie superior es cubierta por una lámina transparente de polietileno, y requiere de orificios en sus lados para la circulación (Fudholi et al., 2009). En la Figura 1.4 se muestra las partes constitutivas de este tipo de secador solar.

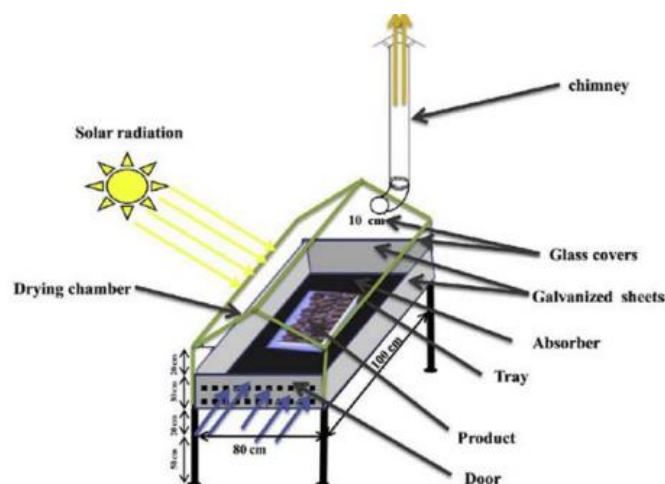


Figura 1.4. Partes del secador solar pasivo

Fuente: (Prakash & Kumar, 2021)

1.4.2.2 Secador solar de convección forzada (secador activo)

Estos secadores disponen de un compresor que fuerza al fluido a circular a través de una cámara de secado, si la cámara está expuesta directamente a la radiación, se conoce como secador solar directo; mientras que, si la cámara se encuentra aislada, se conoce como secador solar indirecto (Fudholi et al., 2009) (Djebli et al., 2020). En la Figura 1.5 se presenta un secador solar activo indirecto.

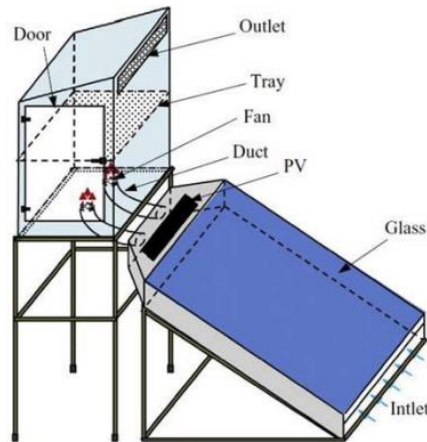


Figura 1.5. Partes del secador solar activo indirecto

Fuente: (Prakash & Kumar, 2021)

1.4.2.3 Secador solar híbrido

Los secadores solares híbridos combinan características de los secadores solares directos e indirectos para mejorar el proceso de secado adaptándose a nuevas tecnologías (Hasanuzzaman et al., 2022), en sus diseños implementan: colectores solares, paneles fotovoltaicos, medios de almacenamiento térmico y/o eléctrico.

En este tipo de secadores híbridos, se tiene el secador solar con unidad auxiliar, el cual dispone de una unidad independiente a la energía solar que añade calor, y actúa cuando el calor obtenido de la energía solar no es suficiente para mantener las condiciones de operación (Fudholi et al., 2009). En la Figura 1.6 se observa que el secador dispone de una unidad auxiliar de calor, en este caso de Biomasa.

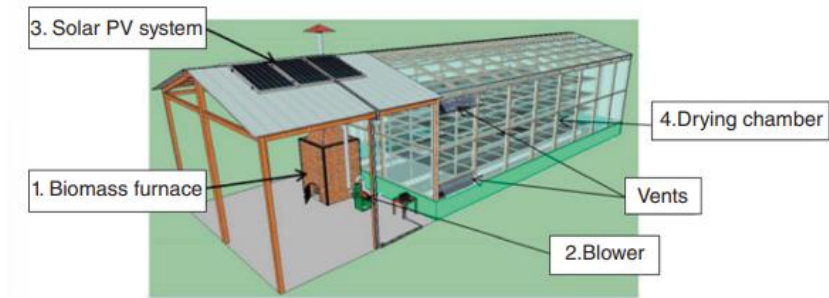


Figura 1.6. Secador solar activo con unidad auxiliar de Biomasa

Fuente: (Prakash & Kumar, 2021)

Otra disposición es el secador solar con concentradores para aumentar la captación de energía solar (Fudholi et al., 209) (Marroquín et al., 2017); los reflectores fotónicos, propiamente corresponden a esta idea de captar mayor energía solar incidente al colector. En la Figura 1.7 se presenta el esquema de los componentes de este tipo de secador solar.



Figura 1.7. Secador solar activo con panel PV y concentrador solar

Fuente: (Marroquín et al., 2017)

Actualmente, la comercialización de paneles solares PVT (PVT-Photovoltaic Thermal), han potenciado el diseño de secadores solares con paneles PVT, este tipo de paneles solares híbridos están constituidos por celdas fotovoltaicas en la parte frontal y un colector de energía térmica en la parte posterior (Fuentes et al., 2018). Las celdas fotovoltaicas energizan un ventilador el mismo que impulsa la circulación del aire a través de la cámara de secado; mientras que, el colector añade calor al aire circundante en la cámara. En la investigación de Guzmán et al. (2021), utilizan como prototipo experimental el secador solar híbrido con paneles PVT, en la Figura 1.8 se muestra el prototipo.



Figura 1.8. Secador solar activo con paneles PVT

Fuente: (Guzmán et al., 2021)

1.4.2.4 Selección del secador solar

Debido a la amplia variedad de los tipos de secadores y sus variaciones, la selección es subjetiva y depende de las condiciones locales y del tipo de productos a deshidratar (Hasanuzzaman et al., 2022). La selección del secador ampliamente depende de la cantidad de grano a ser deshidratado, está referenciado con la producción anual de determinado cultivo (Mujumdar, 2015).

Los componentes del secador solar a considerar son los siguientes (Hasanuzzaman et al., 2022):

- Espacio confinado para transferencia de energía y masa.
- Dispositivo o mecanismo de captación de energía solar.
- Dispositivo o mecanismo que mantenga la circulación de aire.
- Sistema de almacenamiento térmico. (No obligatorio)
- Energía alternativa, unidad auxiliar de calor. (No obligatorio)
- Cobertor transparente.

En esta investigación se selecciona el secador solar híbrido pasivo con colector y almacenamiento térmico, ya que es un tipo de secador que implementa dos mejoras, el aumento de captación de la radiación solar y almacenamiento prolongado de energía térmica.

Además, esta opción tuvo consideraciones constructivas y económicas, ya que la estructura, cámara y cobertor están hechos de materiales de uso común, como lo es la madera y el polietileno que son materiales de bajo costo; para la captación de energía se implementa un colector solar comercial y el almacenamiento de energía esta suplida por el PCM, que también se ofertan varios tipos de PCM en el mercado.

1.4.3 Materiales de cambio de fase (PCMs)

El almacenamiento de la energía capturada, es uno de los problemas en el diseño de secadores, para esto se encapsula en el secador materiales PCMs que almacenan la energía térmica requerida, permitiendo mantener estable la temperatura interna del aire en los niveles requeridos.

En la investigación de Chaatouf et al. (2021), analiza la eficiencia de un secador solar indirecto, integrando un sistema de almacenamiento de calor al encapsular PCMs en tubos de cobre colocados en la cámara de secado; el secador solar con PCM aumenta la eficiencia en aproximadamente un 3,12% por la noche en comparación al caso sin PCM. Según Kosny (2015), en la Figura 1.9 se presenta el esquema de la tipología de los PCMs:

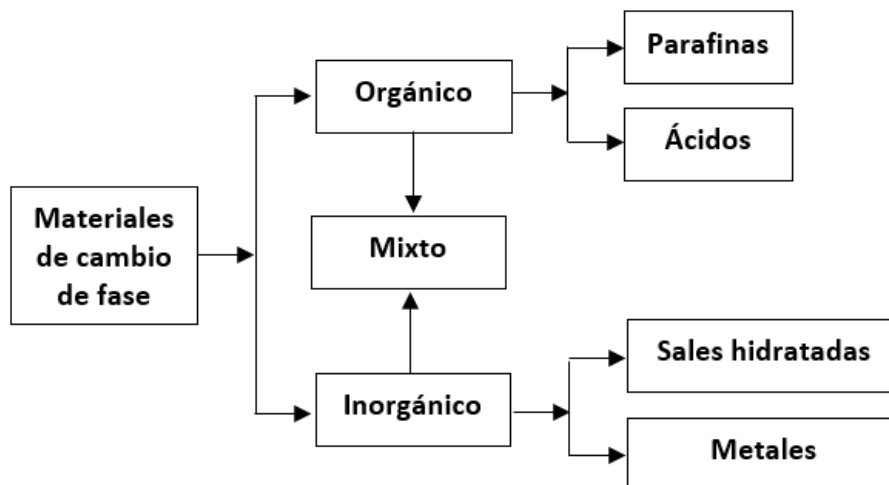


Figura 1.9. Tipología de los PCMs

Fuente: (Kosny, 2015)

1.4.3.1 Orgánicos

En esta categoría se tiene a un grupo de alcanos (C_nH_{2n+2}) materiales derivados de petróleo conocidos como parafina, ver Figura 1.10 (a); y se tiene también un grupo de ácidos grasos ($CH_3(CH_2)_nCOOH$), ver Figura 1.10 (b). Los materiales orgánicos presentan altos valores de calor latente; pero a su vez exhiben baja conductividad térmica (Fleischer, 2015).

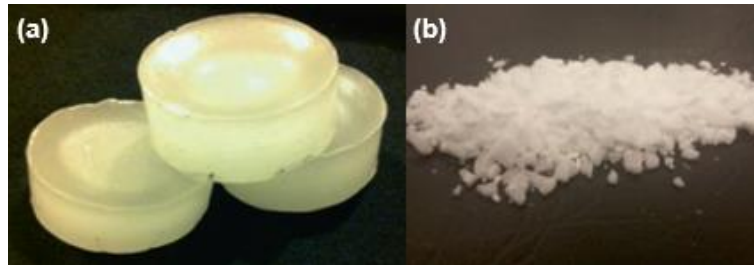


Figura 1.10. PCMs Orgánicos: (a) Parafina y (b) Ácido

Fuente: (Fleischer, 2015)

En la Tabla 1.2 se presentan algunos de los PCMs orgánicos más utilizados:

Tabla 1.2. Propiedades térmicas de PCMs orgánicos

Tipo	Nombre	Punto de fusión (°C)	Calor específico (J/kg·K)	Calor latente (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
Parafina	Heneicosano	41	2386(l)	294,9	773(l)	0,145(l)
	Tricosano	48,4	2181 (l)	302,5	777,6 (l)	0,124 (l)
	Tetracosano	51,5	2924 (l)	207,7	773,6 (l)	0,1376 (l)
Ácido graso	Ácido oléico	13	1744 (l)	75,5	871 (l)	0,103 (l)
	Ácido cáprico	32	1950 (s) 1720 (l)	153	1004 (s) 878 (l)	0,153 (l)
	Ácido esteárico	69	2830 (s) 2380 (l)	202	965 (s) 848 (l)	0,172 (l)

Fuente: (Fleischer, 2015) (Javini, 2014) (Kenisarin, 2010)

1.4.3.2 Inorgánicos

Principalmente, en este grupo están las sales y sales hidratadas, comúnmente se utilizan como PCMs las siguientes: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, $NaNO_3$, KNO_3 , KOH , $MgCl_2$, and $NaCl$, en la Figura 1.11 se muestra (a) una sal y (b) una sal hidratada.

Estos materiales exhiben rangos amplios de puntos de fusión, y varios de estos materiales tienen mayor conductividad térmica que los materiales orgánicos; sin embargo, presentan inestabilidades químicas significativas (Fleischer, 2015).

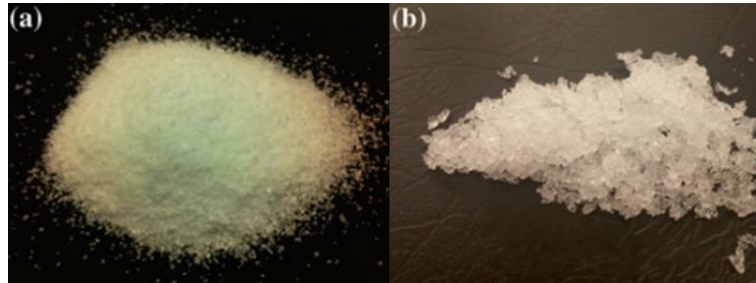


Figura 1.11. PCMs inorgánicos: (a) cloruro de sodio y (b) cloruro de magnesio hexahidratado.

Fuente: (Fleischer, 2015)

En la Tabla 1.3 se presentan algunos de los PCMs inorgánicos utilizados:

Tabla 1.3. Propiedades térmicas de PCMs inorgánicos

Formula Química	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
MgCl ₂ 6H ₂ O	117	168,6	1450 (l)-1569 (s)	0,579 (l)-0,694 (s)
NaSO ₄ 10H ₂ O	32	251	1485 (s)	0,544
NaNO ₃	307	172	2260 (s)	0,5
NaCl	802	492	2160 (s)	5,0

Fuente: (Fleischer, 2015) (Zalba et al., 2003) (Sharma & Sagara, 2005)

En este tipo de PCMs también se tienen algunos metales y aleaciones metálicas, de acuerdo a la temperatura de operación se utiliza a bajas temperaturas metales como cesio, galio, indio, estaño y bismuto, y para altas temperaturas se utiliza zinc, magnesio, aluminio.

Los metales y sus aleaciones tienen un rango amplio de puntos de fusión y alta conductividad, además presenta estabilidad física y química a altas temperaturas; sus limitaciones son su alta densidad y bajo calor latente (Fleischer, 2015). En la Tabla 1.4 se presentan algunos de los PCMs metálicos utilizados:

Tabla 1.4. Propiedades térmicas de PCMs metálicos

Nombre	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
Galio	29,8	80,1	0,237	5907	29,4
Estaño	232	60,5	0,221	730	15,08
Zinc	419	112	0,39(s)-0,48(l)	7140	116
Aluminio	661	388	0,9(s)-0,9(l)	2700	237

Fuente: (Fleischer, 2015) (Khare, 2012)

1.4.3.3 Eutécticos

Los PCMs del tipo eutécticos, son mezclas entre PCMs orgánicos e inorgánicos, los cuales presentan puntos de congelación/fusión bajo o sobre la temperatura de congelación del agua, además, la energía almacenada en estos materiales se encuentra entre -114°C y 164°C (Kanesalingam & Nayak, 2020). Los PCMs eutécticos surgen de la necesidad de eliminar la separación de los componentes y reducir el sub – enfriamiento (Kosny, 2015). En la Tabla 1.5 se presentan algunos de los PCMs eutécticos:

Tabla 1.5. Propiedades térmicas de los PCMs eutécticos orgánicos ácidos

Nombre	Punto de fusión	Calor latente (kJ/kg)
Ácido caprílico-1-dodacanol	6,5	171
Ácido cáprico-palmítico	18	148
Ácido láurico-palmítico	34.2	168.8

Fuente: (Kosny, 2015)

1.4.3.4 Selección del material PCM

El criterio que predomina para la selección de un PCM es su punto de fusión, siendo preferible seleccionar el material con el más alto punto de fusión, pero menor a la temperatura de operación. El siguiente criterio es el calor latente de fusión (kJ/kg) del material, que indica la capacidad de almacenar energía en determinada masa del material. Por lo que, el objetivo sería determinar un material con el punto de fusión más cercano a la temperatura de operación y con el más alto calor latente de fusión (Fleischer, 2015).

De manera general, en la Tabla 1.6 se presentan las ventajas y desventajas de los tipos de PCMs expuestos:

Tabla 1.6. Ventajas y desventajas de cada tipo de PCM.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibles en rangos amplios de temperatura. - Alto calor de fusión. - No se da sub – enfriamiento. - Químicamente estable, y reciclable. - Buena compatibilidad con otros materiales. - Disponible a bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja conductividad térmica. - Cambios de volumen considerables. - Inflamable.
Inorgánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Alto calor de fusión. - Alta conductividad térmica. - Cambios de volumen despreciables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se da sub – enfriamiento. - Efectos corrosivos.
Eutécticos	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de fusión definida. - Alta densidad volumétrica de almacenamiento térmico 	No se dispone de propiedades termo – físicas.

Fuente: (Delgado, 2019)

Según el investigador Delgado, se tiene los siguientes criterios de selección:

Propiedades Termodinámicas:

- Temperatura de fusión en el rango deseado.
- Alto calor latente de fusión por unidad de volumen.
- Alta conductividad térmica.
- Alto calor específico y alta densidad.
- Pequeños cambios de volumen en la transformación de fase.
- Fusión congruente.

Propiedades químicas:

- Estabilidad química.
- Sin degradación después de un gran número de ciclo de congelación/fusión.
- Sin corrosividad.
- No tóxico, no inflamable y no material explosivo.

Aspectos económicos:

- Económico
- Disponibilidad inmediata

De lo expuesto, se selecciona la parafina como PCM, ya que la parafina está disponible en grandes cantidades en el mercado local, es relativamente económica, y constructivamente es de fácil manejo. Además, de lo revisado la parafina es de los PCMs más estudiados y se disponen datos de diferentes fuentes de sus propiedades termo – físicas.

1.4.4 Reflectores fotónicos

La captación de energía es otro de los problemas en el diseño de los secadores solares, ya que la energía de radiación de solar no es recibida y capturada en su totalidad por el colector solar incorporado en el secador, por lo que, se prueba con tecnologías de reciclaje de fotones, que permiten reutilizar fotones, con el propósito de incrementar la eficiencia energética del secador. Esta tecnología en dispositivos semiconductores consiste en la reabsorción de fotones generados del acomodamiento atómico, es decir, consecuentemente se están generando electrones-vacancias que alteran el sistema (Balenzategui & Martí, 2006).

En la investigación de Micha et al. (2018), proponen y realizan tres estrategias de diseño para implementar una cavidad óptica en células solares de película delgada de GaAs con el fin de confinar su luminiscencia interna y, por lo tanto, aprovechar el reciclaje de fotones.

Así también, los investigadores Yu et al. (2013), fabrican celdas solares poliméricas semitransparentes eficientes con cristales fotónicos unidimensionales como un reflector, estos cristales están compuestos por varios pares de WO₃/LiF. Al optimizar los pares de WO₃/LiF, los cristales fotónicos pueden reflejar la luz hacia las celdas solares debido a la brecha de banda fotónica, cuando el rango de alta reflectancia de las celdas se combina con el espectro de absorción de la capa activa. En la Figura 1.12 se observa como la eficiencia de la potencia de absorción se incrementa después de admitir los fotones reciclados.

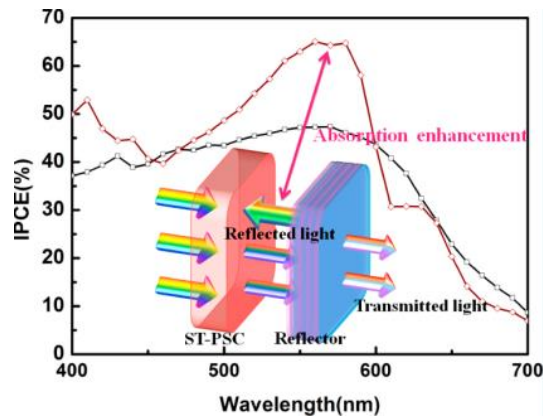


Figura 1.12. Eficiencia de la potencia de absorción

Fuente: (Yu et al., 2013)

En la investigación de Ringeisen et al. (2014), analizan la efectividad de añadir un concentrador solar cóncavo a un secador solar de granos, concentrador construido a bajo costo y con materiales comunes que son de fácil adquisición. El producto deshidratado son tomates tipo Roma con contenido de humedad inicial de 90% se disminuye a 10%. Concluyen que el concentrador es eficaz, ya que reduce el tiempo de secado en un 21%, aumentando incluso la temperatura de la cámara de secado y reduciendo la humedad relativa.

2 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología utilizada, que desde un enfoque cuantitativo del tipo exploratorio y correlacional se analizan las variables que determinan el comportamiento del proceso de secado, variables que se caracterizan a partir de la recolección de información y análisis documental; utilizando la exploración, correlación y comparación como técnicas de análisis de la información, para cumplir con los objetivos planteados.

2.1 Enfoque Metodológico

Los procesos de producción en el Ecuador, han sido concebidos o emulados de soluciones con enfoques sinérgicos, en donde solo se considera el aporte de cada parte para cumplir determinada tarea perdiendo de vista las relaciones entre las partes, para esto se utiliza el enfoque sistémico u holístico que permite dar soluciones integrales desde una perspectiva global considerando las relaciones entre sus partes e interacciones con el entorno (Aguinaga, 2009).

La Mecatrónica se ajusta a esta definición ya que esta ingeniería se fundamenta en la mecánica, electrónica y control, y telecomunicaciones, permitiendo solucionar un problema con criterios de las diferentes disciplinas; es por esto, que se utiliza este enfoque, ya que permite analizar las relaciones entre las variables involucradas en el proceso de secado y sus interacciones con el entorno, para optimizar la eficiencia térmica del secador solar. En la Figura 2.1 se presenta el flujograma de la presente investigación.

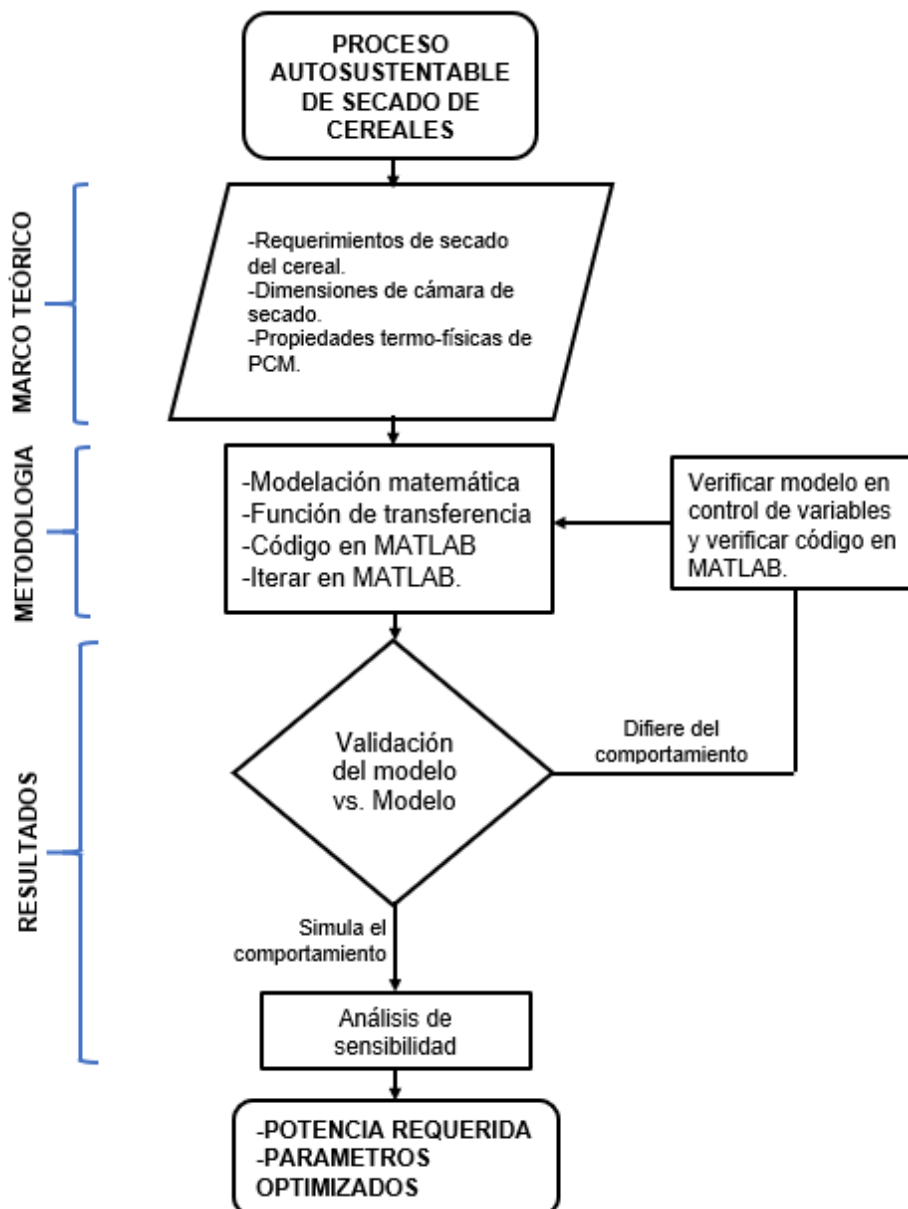


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la investigación

Fuente: (Elaboración propia)

2.2 Descripción del proceso de secado a controlar

El proceso de secado a controlar utiliza la energía de la radiación solar para incrementar y mantener la temperatura de la cámara de secado del secador solar en valores requeridos para la deshidratación del trigo y/o la cebada, que además este secador incorpora el material PCM para almacenar la energía durante el día, y en días nublados o la noche liberar la energía almacenada por el PCM y prolongar el tiempo de calentamiento de la cámara. La circulación del aire es direccionada por la disposición de los agujeros en la cámara de secado. El control de variables propuesto, relaciona la potencia y temperatura requerida. La representación 3D del modelo experimental se presenta en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Modelo experimental a fabricar

Fuente: (Diseño en SolidWorks)

2.3 Análisis termodinámico

El secado consiste en extraer el exceso de agua de un producto reduciendo el contenido de humedad a un valor especificado, con el propósito de extender el tiempo de vida y garantizar la calidad del producto (Prakash & Kumar, 2021).

Para el análisis termodinámico, se tiene la primera ley de la termodinámica que permite determinar la eficiencia térmica del sistema; sin embargo, la eficiencia según la primera ley no indica el potencial de trabajo del sistema, para esto se tiene la segunda ley de la termodinámica que permite determinar la eficiencia exergética e indica el desempeño del sistema (Cengel & Boles, 2015).

2.3.1 Primera ley de la termodinámica: Eficiencia

2.3.1.1 Cámara de secado

La extracción del contenido de humedad para preservar y almacenar el producto utiliza el secado por convección; es un proceso, en donde están involucrados simultáneamente la transferencia de calor y masa que ocurren entre el medio de secado y el producto (Hasanuzzaman, 2022)

Balance de masa

De acuerdo a los investigadores Lamrani et al. (2019), la conservación de la masa en la cámara de secado representa la pérdida de humedad del producto absorbida por el aire seco, esto se representa en la Ecuación 2.1.

$$m_a \frac{dW}{dt} + \dot{m}_a(W - W_o) = -M_o \frac{dX}{dt}$$

Ecuación 2.1. Balance de masa en la cámara

En donde:

m_a : masa del aire de secado (kg)

\dot{m}_a : flujo de masa del aire de secado (kg/s)

W : humedad absoluta del aire en la cámara (kg agua/kg aire seco)

W_o : humedad absoluta del aire en el ingreso a la cámara (kg agua/kg aire seco)

M_o : masa en base a la sequedad (kg)

X : contenido de humedad del producto (kg agua/kg producto seco)

Balance de energía

El investigador Khoiya (2020) menciona que el balance de energía en la cámara implica la pérdida de energía del aire de secado absorbida por el producto, se tiene la Ecuación 2.2.

$$m_a c_{p_a} \left(\frac{dT_a}{dt} + U_a \frac{dT_a}{dt} \right) = h_t A_p (T_p - T_a)$$

Ecuación 2.2. Balance de energía en la cámara

En donde:

T_a : temperatura del aire de secado (K)

T_p : temperatura del producto (K)

U_a : velocidad del aire de secado (m/s)

h_t : coeficiente de transferencia de calor (W/m²·K)

A_p : área de la superficie expuesta del producto (m²)

Cp_a : calor específico del aire de secado (J/kg·K)

2.3.1.2 PCM

De acuerdo a Sarbu & Sebarchievivi (2018), la energía térmica obtenida de la radiación solar puede ser almacenada en dos maneras: como energía térmica sensible y como energía térmica latente.

Almacenamiento de energía térmica sensible

En el almacenamiento de energía del tipo sensible, no se da el cambio de fase del material (sólido/líquido) al variar la temperatura. El agua es el material más común, debido a su alto calor específico; también se tienen materiales como sales fundidas, aceites y metales líquidos, materiales que tienen altos puntos de fusión (Dincer, 2002). Para determinar el calor almacenado se tiene la Ecuación 2.3.

$$Q_s = \int_{T_i}^{T_f} mCp dt = mCp(T_f - T_i)$$

Ecuación 2.3. Calor almacenado del tipo sensible

En donde:

Q_s : calor sensible (J)

m : masa del medio de almacenamiento (kg)

Cp : calor específico (J/kg·K)

T_f : temperatura final (°C)

T_i : temperatura inicial (°C)

Almacenamiento de energía térmica latente

Los sistemas de almacenamiento de energía del tipo latente brindan mayores prestaciones que los sistemas del tipo sensible, ya que disponen de mayor densidad de almacenamiento y reducción de las pérdidas al ambiente; operan en rangos cortos de temperatura; sin embargo, se debe considerar efectos de segregación del material durante los ciclos de operación (Pielichowska & Pielichowski, 2014). El calor almacenado en este caso se determina con la Ecuación 2.4.

$$Q_l = ml_f$$

Ecuación 2.4. Calor almacenado del tipo latente

En donde:

Q_l : calor latente (J)

l_f : calor latente de fusión (J/kg)

2.3.1.3 Colectores solares: reflectores fotónicos

Los colectores básicamente consisten en exponer una superficie a la radiación solar, parte de esta irradiación es absorbida, incrementando así la temperatura de la superficie; luego, la energía térmica es transportada a través de un fluido de trabajo (Hasanuzzaman et al., 2019). El calor generado depende específicamente del área de la superficie expuesta (Treichel & Cruickshank, 2021). La energía térmica absorbida está determinada por la Ecuación 2.5.

$$\dot{Q}_{cs} = IA(\tau\alpha)$$

Ecuación 2.5. Flujo de calor absorbido por el colector solar

En donde:

\dot{Q}_{cs} : flujo de calor absorbido por el colector solar (W)

I : intensidad de irradiación (W/ m²)

A : área de incidencia (m²)

τ : coeficiente de transmitancia

α : coeficiente de absorción

Las pérdidas de calor en el colector se determinan con la Ecuación 2.6:

$$\dot{Q}_{perdc} = U_L A (T_o - T_i)$$

Ecuación 2.6. Pérdidas de calor en el colector

En donde:

\dot{Q}_{perdc} : flujo de calor perdido en el colector (W)

U_L : coeficiente global de transferencia de calor (W/m²K)

A : área de transferencia (m²)

T_o : temperatura del colector (°C)

T_i : temperatura ambiente (°C)

2.3.1.4 Eficiencia térmica

De acuerdo a la investigación de Aguinaga et al. (2020), la eficiencia del secador está dado por la relación entre el calor absorbido (Q_{Abs}) por el secador y el calor nominal (Q_N) para mantener la cámara en condiciones estables requeridas. El calor absorbido, calor nominal y eficiencia se calcula utilizando las Ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9, respectivamente.

$$Q_{Abs} = m_h \cdot C_s \cdot (T_{out} - T_{amb})$$

Ecuación 2.7. Calor absorbido

$$Q_N = m_h \cdot C_s \cdot (T_{fix} - T_{amb})$$

Ecuación 2.8. Calor nominal

$$\eta_I = \frac{Q_N}{Q_{Abs}}$$

Ecuación 2.9. Eficiencia térmica del secador solar

En donde:

Q_{Abs} : calor absorbido (J)

Q_N : calor nominal (J)

m_h : masa de aire húmedo (kg)

C_s : capacidad específica del aire (J/kg·K)

T_{out} : temperatura de salida (°C)

T_{amb} : temperatura ambiente (°C)

T_{fix} : temperatura requerida (°C)

η_I : eficiencia térmica

2.3.2 Segunda ley de la termodinámica: Exergía

De acuerdo a Cengel & Boles (2015) “La segunda ley es una herramienta utilizada en la optimización de sistemas termodinámicos; la eficiencia según la segunda ley relaciona la eficiencia térmica real y la eficiencia térmica máxima (reversible) posible en las mismas condiciones”. La Ecuación 2.10 permite determinar la eficiencia térmica máxima reversible.

$$\eta_{tér,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Ecuación 2.10. Eficiencia térmica reversible

La eficiencia según la segunda ley se determina con la Ecuación 2.11.

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_{tér,rev}}$$

Ecuación 2.11. Eficiencia exergética

En donde:

$\eta_{tér,rev}$: eficiencia térmica reversible

T_L : temperatura baja (K)

T_H : temperatura alta (K)

η_{II} : eficiencia exergética

2.4 Espacio de estado

Generalmente, los sistemas dinámicos son modelados con un sistema de ecuaciones diferenciales, del cual se obtiene la relación de las variables del proceso en función del tiempo. En el control de variables, el sistema dinámico se modela como una planta en donde las variables se definen como entradas, salidas y perturbaciones, ver la siguiente representación:

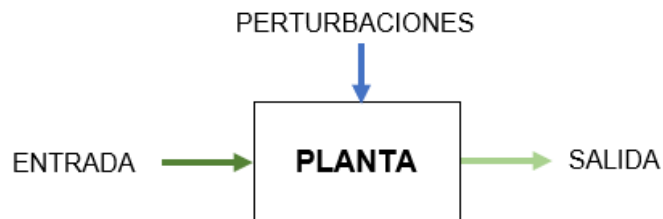


Figura 2.3. Idealización de un proceso en control de variables

Fuente: (Elaboración propia)

Debido a las limitaciones que se tiene en la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales, la ecuación diferencial de orden n se transforma en un sistema de n ecuaciones de primer orden, ecuaciones planteadas en forma matricial que corresponde a la representación del Espacio de Estado; en esta representación se tienen las Funciones de Transferencia, funciones que son la relación entre las salidas y entradas. Para el presente caso, que se trata de un sistema SISO, simple entrada con simple salida, se tiene una sola Función de Transferencia. En la siguiente representación se tiene como entrada la potencia calórica captada de la radiación solar y la respuesta corresponde a la variación de temperatura respecto al ambiente, estrictamente se tiene también la temperatura y presión atmosférica como perturbaciones.

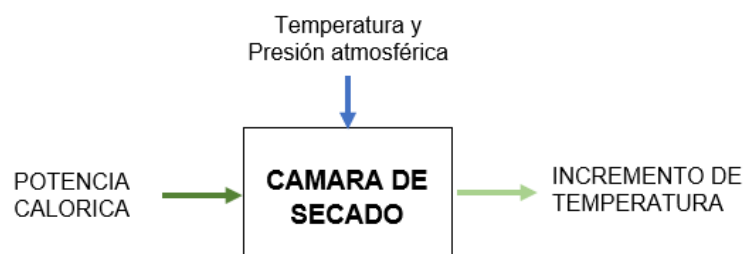


Figura 2.4. Idealización del proceso a controlar

Fuente: (Elaboración propia)

2.4.1 Sistema térmico/termodinámico cerrado

Un sistema térmico/termodinámico es una porción en el espacio que tiene una sustancia en su interior, sustancia que puede ser: líquida, sólida, gaseosa; sistema en donde se evalúa la variación de energía respecto a la entrada, salida e interacciones de energía. Delimitando la investigación, se considera sin flujo de masa, ya que el secador solar seleccionado es de convección natural y el flujo de aire en la cámara de secado es despreciable. En el sistema propuesto, un sistema cerrado, se tiene la variación interna de energía y flujo energético. Ver Figura 2.5.

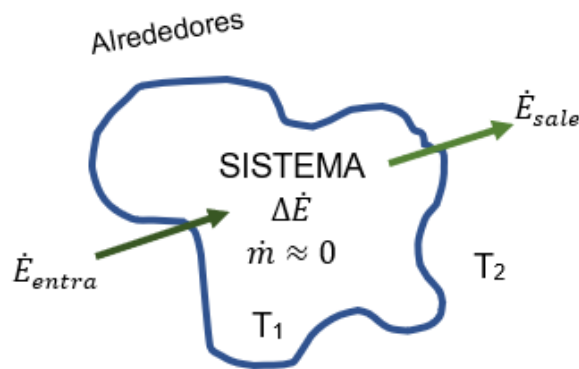


Figura 2.5. Sistema cerrado

Fuente: (Elaboración propia)

De la primera ley de la termodinámica se tiene la Ecuación 2.12:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

Ecuación 2.12. Balance de energía en el sistema

En donde:

$\Delta \dot{E}$: variación en el tiempo de energía interna del sistema (W)

\dot{E}_{entra} : flujo de energía que ingresa al sistema (W)

\dot{E}_{sale} : flujo de energía que sale del sistema (W)

La variación de la energía interna del sistema está dada por la Ecuación 2.13:

$$\Delta E = v \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Ecuación 2.13. Variación interna de energía en el sistema

En donde:

ΔE : variación de energía interna del sistema (J)

v : volumen que ocupa la sustancia en el sistema (m³)

ρ : densidad de la sustancia (kg/m³)

Cp : calor específico de la sustancia (J/kg·K)

ΔT : variación de temperaturas (°C)

De las Ecuaciones 2.12 y 2.13, se tiene la siguiente Ecuación diferencial 2.14:

$$v \cdot \rho \cdot Cp \cdot \frac{d\Delta T}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

Ecuación 2.14. Balance de energía

2.4.2 Mecanismos de transferencia de calor

2.4.2.1 Conducción

Corresponde a los materiales en contacto a distintas temperaturas, para su cálculo se tiene la Ecuación 2.15.

$$\dot{Q}_{cond} = k_{cond} \cdot L \cdot (T_1 - T_2)$$

Ecuación 2.15. Flujo de calor por conducción

En donde:

\dot{Q}_{cond} : flujo de calor por conducción (W)

k_{cond} : coeficiente transferencia de calor por conducción (W/m·K)

L : longitud de transferencia (m)

T_1, T_2 : temperatura alta y temperatura baja (°C)

2.4.2.2 Convección

En este tipo de mecanismo considera áreas de los fluidos; se tiene natural o forzada. La Ecuación 2.16 permite su cálculo.

$$\dot{Q}_{conv} = k_{conv} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

Ecuación 2.16. Flujo de calor por convección

En donde:

\dot{Q}_{conv} : flujo de calor por convección (W)

k_{conv} : coeficiente transferencia de calor por convección (W/m²K)

A : área de transferencia (m²)

T_1, T_2 : temperatura alta y temperatura baja (°C)

2.4.2.3 Radiación

Se trata de ondas electromagnéticas que transfieren energía; el flujo de calor por radiación se obtiene de la Ecuación 2.17.

$$\dot{Q}_{rad} = k_{rad} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Ecuación 2.17 Flujo de calor por radiación

En donde:

\dot{Q}_{rad} : flujo de calor por radiación (W)

k_{rad} : coeficiente transferencia de calor por radiación (W/K⁴)

T_1, T_2 : temperatura alta y temperatura baja (K)

2.4.2.4 Coeficiente global de transferencia de calor

De acuerdo a Cengel & Ghajar (2011) "generalmente en sistemas complejos se utiliza el coeficiente global de transferencia de calor ya que es más práctico de determinar; coeficiente que considera todos los mecanismos de transferencia de calor".

Para determinar este flujo de calor se tiene la Ecuación 2.18.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

Ecuación 2.18 Flujo de calor general

En donde:

\dot{Q} : flujo de calor (W)

U : coeficiente global de transferencia de calor (W/m²K)

A : área de transferencia (m²)

T_1, T_2 : temperatura alta y temperatura baja (°C)

2.5 Modelo linealizado

2.5.1 Suposiciones

Las suposiciones predefinidas para la modelación son las siguientes:

- Los mecanismos de transferencias de calor y masa son unidimensionales.
- El flujo de aire es despreciable, sin dispositivo de circulación forzada de aire.
- La temperatura del cereal en equilibrio con la cámara de secado.
- La variable de control es la diferencia de temperatura, ΔT .
- Periodos de tiempo prolongados, en minutos y horas, estado estacionario.
- Cámara de secado a presión atmosférica.

2.5.2 Representación en espacio de estados

Reorganizando la Ecuación diferencial 2.14, se tiene la Ecuación 2.19:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \frac{P_q}{m \cdot Cp} - \frac{Pérdidas}{m \cdot Cp}$$

Ecuación 2.19. Balance de energía equivalente

En donde:

P_q : potencia calórica requerida (W)

$P_{\text{érridas}}$: potencia calórica perdida (W)

m : masa de la sustancia (kg)

C_p : calor específico de la sustancia (°C)

La Ecuación 2.19 es presentada en espacio de estado y se tiene el modelo matemático en la Ecuación 2.20.

$$\Delta\dot{T} = \left[-\frac{P_{\text{érridas}}}{mC_p} \right] \cdot [\Delta T] + \left[\frac{1}{mC_p} \right] \cdot P_q$$

$$Y = [c] \cdot [\Delta T] + [0] \cdot P_q$$

Ecuación 2.20. Representación en espacio de estado

2.6 Modelo experimental

La validación del modelo de control de variables propuesto se lleva a cabo utilizando un modelo experimental para monitorear la temperatura de la cámara de secado en función del tiempo. En la Figura 2.6 se presentan las partes del modelo experimental.

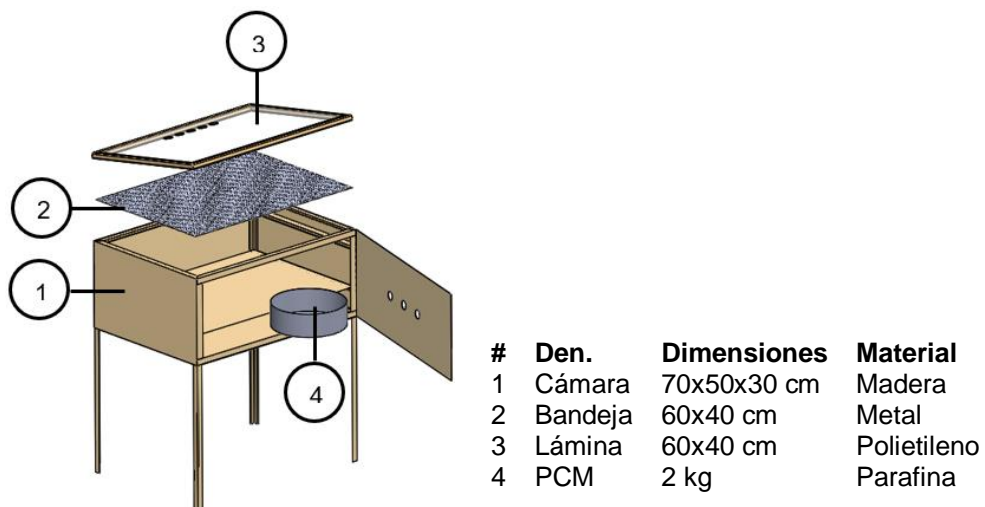


Figura 2.6. Partes del modelo experimental

Fuente: (Diseño en SolidWorks)

2.6.1 Procedimiento de experimentación

Arreglo 1:

1. Quitar la parafina del secador;
2. Incrementar la temperatura de la cámara de secado hasta 56°C, y esperar 10 minutos hasta que el sistema esté en equilibrio.
3. Monitorear la temperatura de la cámara de secado durante 20 minutos en intervalos de 1 minuto.
4. Repetir el procedimiento 5 veces.

Arreglo 2:

1. Incorporar 2kg de parafina al secador;
2. Incrementar la temperatura de la cámara de secado y de la parafina hasta 56°C, y esperar 10 minutos hasta que el sistema esté en equilibrio.
3. Monitorear la temperatura de la cámara de secado durante 4 horas, inicialmente en intervalos de 5 minutos, luego 15 minutos, progresivamente considerando cambios notables de temperatura.
4. Repetir el procedimiento 5 veces.

Se utiliza el multímetro con termocupla marca FULGORE modelo FU1247 para las mediciones de temperatura.

2.7 Simulación numérica

Actualmente en ingeniería todo estudio significativo de optimización utiliza el poder y flexibilidad de las computadoras y métodos numéricos, en donde se requiere el estudio paramétrico para entender la influencia de determinadas variables sobre el resultado; al ser un proceso iterativo, es eficaz utilizar software especializado para estos cálculos, que de manera versátil se modifica el código y/o variables de entrada (Cengel & Cimbala, 2010). En la presente investigación se utiliza el software MATLAB, precisamente el módulo Control System Toolbox que admite modelos de espacio de estados SISO o MIMO en tiempo continuo o discreto; en donde el modelo de espacio de estados representa matemáticamente un sistema físico como un conjunto de variables de entrada, salida y estado relacionadas mediante ecuaciones diferenciales de primer orden (MathWorks, 2022).

2.7.1 Valores ingresados

En la Tabla 2.1 se muestran los valores considerados de cada parámetro para la simulación del modelo matemático en MATLAB.

Tabla 2.1. Valores ingresados a MATLAB

Descripción	Parámetro	Unidades	Valor	Referencia
Ecuador: Región Interandina	Temperatura ambiente	$T_a [^{\circ}C]$	10,0-22,0	(INAMHI, 2022)
	Horas efectivas de radiación solar	$t_e [horas]$	6,0	
Cereal: Trigo y Cebada	Temperatura de secado	$T_s [^{\circ}C]$	50,0-60,0	(Prakash & Kumar, 2021)
Cámara de secado	Volumen de la cámara: a x b x c	$V_c [m^3]$	0,1	(Fudholi et al., 2009)
	Coefficiente global de transferencia	$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	0,8-1,3	(Cruickshank & Harrison, 2010)
	Densidad del aire	$\rho_a \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	1,2	(Cengel & Boles, 2015)
	Calor específico del aire	$C_{p_a} \left[\frac{J}{kg \cdot ^{\circ}C} \right]$	1012,0	
PCM: Parafina Wax	Temperatura de fusión de la parafina	$T_{fp} [^{\circ}C]$	56,0	(Fleischer, 2015) (Murali et al., 2015)
	Calor específico de la parafina	$C_{p_p} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	2400,0	
	Calor latente de la parafina	$C_L \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	142,7	

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Etapa de Calentamiento: Control lazo abierto

La simulación en lazo abierto permite determinar la potencia calórica requerida para alcanzar y mantener la cámara de secado a la temperatura de operación. La respuesta tipo escalón del modelo matemático en espacio de estado durante la etapa de calentamiento de la cámara de secado se presenta en la Figura 3.1, el incremento de 41°C respecto a la temperatura ambiente de 15°C permite alcanzar 56°C en la cámara de secado aproximadamente en 4 horas, entre las 9:00 y 13:00, esta temperatura de 56°C se mantiene durante 2 horas hasta las 15:00, después de esta hora los niveles de radiación solar empiezan a disminuir o a su vez se tienen nubosidades, por lo que el colector queda deshabilitado. La potencia requerida es de 76 W para alcanzar 56°C en 4 horas, que corresponde a la mañana, posteriormente se debe suministrar 40 W adicionales durante 2 horas para la fusión de la parafina manteniéndose la cámara de secado en 56°C bajo las condiciones indicadas en la Tabla 2.1. Desde las 15:00 que el colector queda inhabilitado, la cámara de secado se mantiene en 56°C durante 1 hora hasta que la parafina libere la energía latente de 284 kJ y se solidifique completamente, este tiempo depende de las pérdidas de calor en la cámara de secado que corresponde a 63 W. Luego de las 16:00 inicia la etapa de enfriamiento.

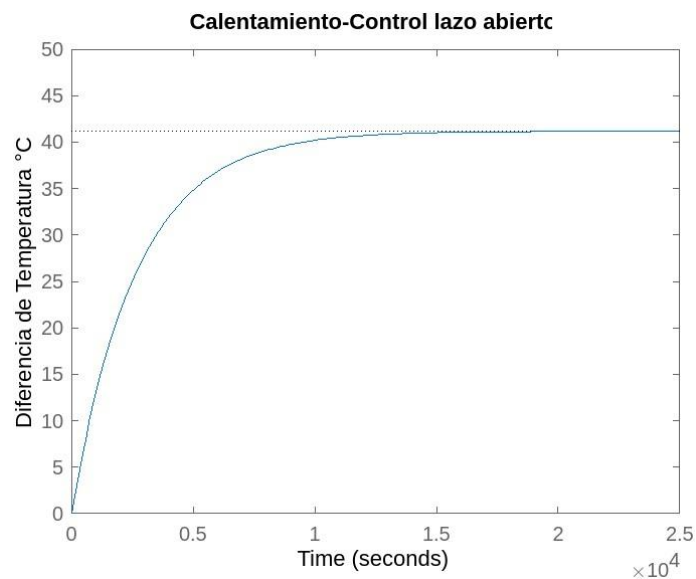


Figura 3.1. Control lazo abierto – Calentamiento

Fuente: (Simulación en MATLAB)

3.1.2 Etapa de Enfriamiento

A las 16:00 inicia la etapa de enfriamiento, ya que los niveles de radiación disminuyen y se está próximo a la noche que corresponde a las 19:00 y el colector está inhabilitado. En la figura 3.2 se tiene la respuesta tipo escalón del modelo matemático en el cual ya no se dispone de la potencia calórica, por lo que el tiempo de enfriamiento depende de la pérdida de calor en el secador de 63 W y la temperatura ambiente de 15°C, se observa que la cámara de secado baja de 56°C a 20°C después de 4 horas, que correspondería a las 20:00 y prologándose hasta aproximadamente 2 horas más con temperatura de 20°C incluso superior a la ambiental.

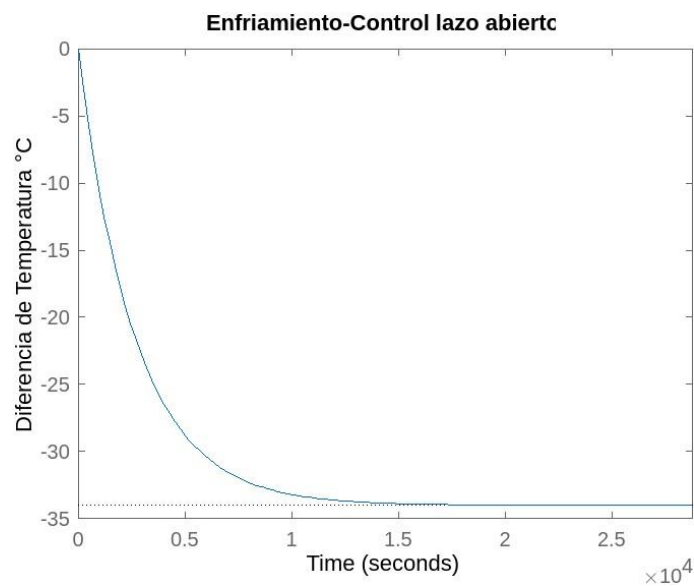


Figura 3.2 Control lazo abierto – Enfriamiento

Fuente: (Simulación en MATLAB)

3.1.3 Validación: Curva de enfriamiento

Cumpliendo con el protocolo de pruebas, en la Figura 3.3 se grafica los resultados obtenidos de monitorear la temperatura de la cámara de secado, la curva A1 corresponde al secador solar ordinario sin PCM que rápidamente descende la temperatura de la cámara de 56°C a 24°C en 15 minutos; en contraste se tiene la curva A2 que corresponde al secador solar con PCM en el cual la temperatura descende también de 56°C a 24°C pero en este caso en 4 horas; este comportamiento era el esperado.

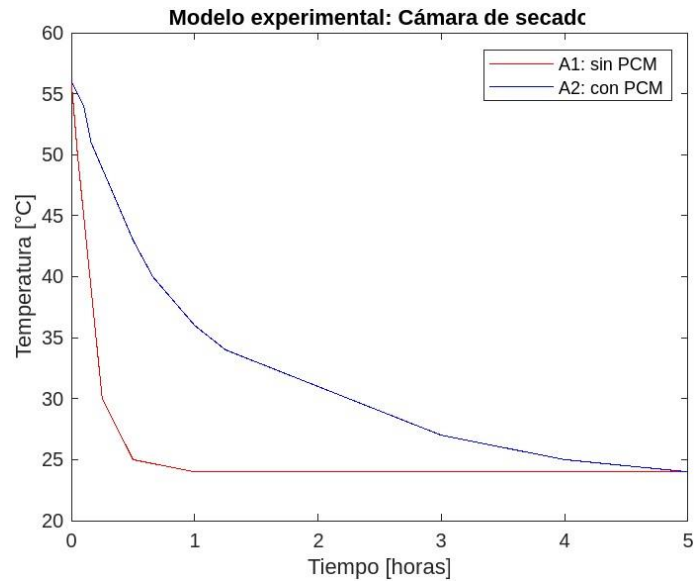


Figura 3.3. Monitoreo de temperatura de la cámara de secado

Fuente: (Graficado en MATLAB)

3.1.4 Análisis de sensibilidad

3.1.4.1 Dimensiones de la cámara

Los arreglos para la variación del área superficial de la cámara de secado se analizan variando las dimensiones de la cámara. En la Tabla 3.1, se presentan tres arreglos:

- D0: condición inicial, la cámara admite 1 bandeja.
- D1: se reduce a la mitad el alto de la cámara, la cámara admite 1 bandeja.
- D2: 1,2 m largo, 0,4 de ancho y 0,15 alto, la cámara admite 2 bandejas.

Tabla 3.1. Variaciones de dimensiones de la cámara.

Cámara de secado – Dimensiones						
ARREGLO	Área [m ²]	Pot _{req} [W]	Pérdidas [W]	Eficiencias		Control
				η_I [%]	η_{II} [%]	Tiempo [horas]
D0	1,4	76,0	75,7	10,7	85,9	6,9
D1	1,1	57,0	56,5	10,0	80,4	9,7
D2	1,4	77,0	76,8	10,5	84,1	3,8

Fuente: (Simulación en Matlab)

El arreglo D2 es una opción óptima ya que la cámara de secado ahora admite dos bandejas, en comparación a los arreglos D0 y D1 que admiten una; además el tiempo en alcanzar la temperatura de secado se reduce a aproximadamente 4 horas que corresponde a la radiación solar disponible en la mañana, manteniendo la potencia requerida de 76 W del arreglo D0. El arreglo D1 no es factible ya que se estabiliza en casi 10 horas y no se tiene por tanto tiempo la radiación solar requerida.

3.1.4.2 Aislamiento de paredes

Los arreglos propuestos para la variación del coeficiente global de transferencia de calor se manejan dentro de valores referenciados. En la Tabla 3.2, se presentan tres arreglos:

- U0: condición inicial.
- U1: se disminuye el coeficiente a 1,0. U2: se disminuye el coeficiente a 0,8.

Tabla 3.2. Variaciones de aislamiento

Cámara de secado - Aislamiento						
ARREGLO	$\frac{U}{[m^2 \cdot K]}$	Pot_{req} [W]	Pérdidas [W]	Eficiencias		Control Tiempo [horas]
				η_I [%]	η_{II} [%]	
U0	1,3	76,0	75,7	10,7	85,9	6,9
U1	1,0	59	58,2	09,8	78,7	9,2
U2	0,8	47	47,6	10,8	86,3	11,1

Fuente: (Simulación en Matlab)

En los tres arreglos las potencias son manejables, sin embargo, conseguir un coeficiente global de transferencia de calor muy bajo es complicado ya que implicaría mejorar el aislamiento de la cámara de secado, incrementando los costos de fabricación, peso y afectando la ergonomía del secador solar. Por lo que, el arreglo U2 estarían descartado definitivamente, además que este arreglo requiere de mayor potencia para reducir el tiempo de estabilización, 11 horas que es un periodo de tiempo no disponible; para reducir este tiempo se debería aumentar la potencia calórica, pero continua presente los excedentes en los costos. El arreglo U1 podría ser una opción manejable, ya que se prolonga el tiempo de enfriamiento de la cámara de secado al reducir las pérdidas a 58 W, no obstante, no es práctico por las complicaciones de fabricación expuestas, en su lugar se cambia el coeficiente global de transferencia a 1.2 y se aumenta la cantidad de parafina para prologar el tiempo de enfriamiento.

3.1.4.3 Cantidad de Parafina

Respecto a la cantidad de parafina que admite el secador solar, en la Tabla 3.3, se presentan tres arreglos:

- P0: condición inicial.
- P1: mitad de cantidad inicial.
- P2: doble de cantidad inicial.
- P3: triple de cantidad inicial.

Tabla 3.3. Variaciones de peso de parafina

Cámara de secado – Cantidad de parafina						
ARREGLO	Peso [kg]	Pot_{req} [W]	Pérdidas [W]	Eficiencias		Control
				η_I [%]	η_{II} [%]	Tiempo [horas]
P0	2,0	76,0	75,7	10,7	85,9	6,9
P1	1,0	76,0	75,7	09,9	79,9	3,8
P2	4,0	76,0	75,7	10,5	84,7	13,8
P3	6,0	76,0	75,7	09,9	79,4	22,2

Fuente: (Simulación en Matlab)

En todos los arreglos se mantiene constante la potencia calórica requerida y las pérdidas de calor; la variación de parafina afecta al tiempo de estabilización, ya que a mayor cantidad de parafina se requiere mayor tiempo de captación de energía para variar la temperatura en la cámara de secado.

Definitivamente los arreglos P2 y P3 no son factibles por los tiempos prolongados, además que requiere de mayor espacio en la cámara. Los arreglos P0 y P1 son opciones factibles ya que están dentro de los periodos de tiempo disponibles de radiación solar; del análisis entre P0 y P1, se determina que 1,5 kg requiere de aproximadamente 4,5 horas para estabilizar la temperatura de la cámara de secado, periodo de tiempo que concuerda con las horas efectivas de radiación solar.

3.1.5 Parámetros optimizados

Luego de realizar el análisis paramétrico se concluye en modificar a los valores presentados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros optimizados

CÁMARA DE SECADO	PARÁMETRO	ARREGLO	
		INICIAL (OP1)	ÓPTIMO (OPT1)
Dimensiones	Alto	0,3	0,15
	Ancho	0,5	0,4
	Largo	0,7	1,2
Aislamiento	Coefficiente global	1,3	1,2
Parafina	Peso	2	1,5

Fuente: (Simulación en Matlab)

Los resultados de la simulación con los parámetros modificados se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados de los arreglos: OP0 vs. OP1.

	ARREGLO		Pot_{req} [W]		$Pérdidas$ [W]		Eficiencias		Control			
	OP0	OP1					η_I [%]	η_{II} [%]	Tiempo [horas]			
			76,0	71,0	75,7	70,8	10,7	10,7	85,9	86,3	6,9	5,5
Bandejas que admite	1	2										

Fuente: (Simulación en Matlab)

La potencia requerida se redujo de 76 W a 71 W, la eficiencia térmica se mantiene constante en 10,7%, y la eficiencia exergética se incrementó en 0,4%, que no es significativo. El tiempo de estabilización se redujo a 5,5 horas, que es un periodo de tiempo razonable de acuerdo a las horas efectivas de radiación solar disponibles.

Este arreglo es óptimo por dos hechos: este arreglo optimizado admite una bandeja adicional para secado en comparación al arreglo inicial, y manteniendo la misma potencia requerida, el otro hecho, con una menor potencia calórica requerida la cámara de secado alcanza la temperatura de operación en un menor tiempo, en casi 2 horas más rápido.

3.2 Conclusiones

La eficiencia térmica en el secador solar seleccionado fue optimizada, ya que al implementar el material PCM en la cámara de secado, durante la etapa de enfriamiento cuando no se dispone de radiación solar se mantuvo 1 hora en la temperatura de operación de 56°C y prolongó el tiempo de enfriamiento a 5 horas contrario al secador solar ordinario que su etapa de enfriamiento dura 15 minutos; así también, de la revisión bibliográfica se evidencia que implementar los reflectores fotónicos en el secador solar reduce el tiempo de secado en un 21% frente al secador solar ordinario, por lo que, se consigue la deshidratación sustentable del trigo y la cebada en la región interandina del Ecuador.

El secador solar directo de convección natural seleccionado, admite la implementación de PCMs en su diseño, el volumen es de 0,1 m³ que es un valor dentro de los referenciados; el material PCM seleccionado corresponde a la parafina wax con punto de fusión a 56°C igual a la temperatura de secado que es uno de los criterios de selección, además que es un material de fácil adquisición y bajo costo.

El modelo matemático en espacio de estado analizado se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, que corresponde al balance de energía de un sistema cerrado de calentamiento/enfriamiento, en donde, la variación de energía interna del sistema cerrado es igual a la energía suministrada considerando las pérdidas de energía propias del sistema. El tiempo de respuesta a la entrada escalón depende absolutamente de la relación entre las pérdidas y la capacitancia del aire + parafina, en donde, el coeficiente global de transferencia de calor y la masa de parafina determinan la velocidad de calentamiento/enfriamiento.

El modelo experimental permitió evidenciar la utilidad que tienen los PCMs en procesos que requieren almacenar energía, ya que, cumpliendo con el protocolo de pruebas, se observó que la temperatura de la cámara de secado sin PCM demora en estabilizarse a la temperatura ambiente en 15 minutos, mientras que la cámara de secado con 2 kg de PCM demoró en estabilizarse a la temperatura ambiente en aproximadamente 5 horas; por lo que se demuestra el aumento de la eficiencia del sistema de energía solar.

El análisis de sensibilidad permitió determinar los valores óptimos de los parámetros involucrados en el proceso de secado, como lo es: las dimensiones de la cámara de secado, el aislamiento de las paredes de la cámara y la cantidad de parafina que son prácticamente los parámetros que definen la potencia calórica requerida y el tiempo de estabilización del proceso. La nueva cámara de secado ahora admite dos bandejas, para misma potencia de 76 W que el secador de una bandeja; además se consiguió estabilizar el proceso en 5 horas, que corresponde a la radiación solar disponible en la mañana; para esto se ajustaron: el coeficiente global de transferencia de calor a 1.2 y la masa de parafina a 1,5 kg. La eficiencia energética se mantuvo constante, y la eficiencia exergética aumento 0,4%.

3.3 Recomendaciones

Considerar imperativo el uso de energías renovables en los procesos productivos del país, con el propósito de iniciar un cambio acelerado de la matriz energética proyectándose hacia la inserción de tecnologías verdes.

Las simulaciones que se requieren del modelo matemático se realizaron en MATLAB, que es un software pagado, un aporte para la investigación correspondería en generar el código en un software libre, como por ejemplo PHYTON.

El modelo matemático en control de variables propuesto considera como variable de control la diferencia de temperatura de la cámara de secado; sin embargo, puede estudiar el modelo matemático considerando un sistema abierto que permitiría describir de mejor manera el comportamiento del proceso de secado.

Continuar con la investigación de implementar PCMs y reflectores fotónicos en procesos de secado, ya que, a partir de este trabajo, disponen los próximos investigadores de valores referenciales para diseñar modelos experimentales.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J. (2015). Trigo. Biotrendies. Obtenido de: <https://biotrendies.com/cereales/trigo>.
- Aguinaga, Á. (2009). Aprovechamiento holístico de la mecatrónica en los procesos de manufactura industriales. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito.
- Aguinaga, A., Ávila, C., Hidalgo, V., Orquera, E. (2020). Assess the use of Solar Dryer with Photonic Solar Reflectors and PCMs in Farming Products in the Andean Region. Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'20). DOI: 10.11159/icmie20.102.
- Balenzategui J.L., A. Martí. (2006). Detailed modelling of photon recycling: application to GaAs solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 1068–1088. doi:10.1016/j.solmat.2005.06.004
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F., Dewitt, D. (2011). *Heat and Mass Transfer*. USA: John Wiley & Sons.
- Cengel Y., Boles, M. (2015). *Thermodynamics*. NJ. USA: MC Graw Hill Education.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2010). *Fluid Mechanics*. NJ. USA: MC Graw Hill Education.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Heat and Mass Transfer*. NJ. USA: MC Graw Hill Education.
- Chaatouf, D., Salhi, M., y Benyounes Raillani. (2021). Assessment of a heat storage system within an indirect solar dryer to improve the efficiency and the dynamic behavior.
- Cruickshank, A., Harrison, J. (2010). Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage. *Energy and Buildings*. Elsevier B.V. All rights reserved. doi:10.1016/j.enbuild.2010.04.013.
- Delgado, J., Martinho, J., Sá, A., Guimarães, A., Abrantes, V. (2019). *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials*. Porto. Portugal: Springer
- Dincer, I. (2002). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*, 34(4), 377e388.
- Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Haddad, B., & Benhamou, A. (2020). Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. *Renewable Energy*.

- Espinoza V., Fontalvo J., Martí-Herrero J., Ramírez P., Capellán-Pérez I. (2019). Future oil extraction in Ecuador using a Hubbert approach. *Energy*. 182 (2019) 520-534.
- Fleischer, S. (2015). *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials*. USA: Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- Fudholi A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Sulaiman, M.Y. (2009). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 1–30
- Fuentes, M., Vivara, M., de la Casa, J., Aguilera, J. (2017). An experimental comparison between commercial hybrid PV-T and simple PV systems intended for BIPV. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 93, October 2018, Pages 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.021>.
- Garofalo, J., Ponce, L., y Abad G., S. (2011). *Guía del cultivo de trigo*. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Cereales. (Boletín Divulgativo no. 411).
- Golla, S.; Gerke, S. (2018). “Primer estudio para una transición energía sostenible del Ecuador “El fin del Petróleo””. *Revista Técnica “energía”*. No. 14, Pp.
- Guzmán – Hernández, T., Obando – Ulloa, J., Castro – Badilla, G., Arguelles – Ulloa, V., y Ortiz – Martínez, J. (2021). Nuevo diseño y aplicación para secadores solares activos y pasivos en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-1. Enero – Marzo 2022. Pág 79-89.
- Hasanuzzaman, M., Fayaz, H., Rahim, N. A., Nasrin, R., & Rivai, A. (2019). Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM. *Renewable Energy*, 143, 827e841. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.041>.
- Hasanuzzaman, Md. (2022). *Technologies for Solar Thermal Energy*. United Kingdom: Elsevier.
- Holguín, B., Alvarado, A. (2017). Comportamiento de la producción de harina de trigo en Ecuador. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Ecuador, (octubre 2017). En línea: <http://www.eumed.net/coursecon/ecolat/ec/2017/produccion-harina-trigo.html>.
- IEA. (2014). *World Energy Outlook 2014*. <https://doi.org/10.1787/weo-2014-en>.

- INAMHI. (2022). Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas. Obtenido de: <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/novedades>.
- INIAP. (2014). Cultivos. Obtenido de: <http://tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/explore-2/mcereal/rtrigo>.
- Javani, N., Dincer, I., Naterer, G.F., & Yilbas B.S. (2014). Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 72, May 2014, Pages 690-703. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.076>.
- Kanesalingam, S. & Nayak, R. (2020). *Sustainable Phase Change and Polymeric Water Absorbent Materials*. Brunswick. Australia: Springer.
- Kenisarin, M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 14(3), pages 955-970, April.
- Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2012). Selection of materials for high temperature latent heat energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.07.020>
- Khouya, A. (2020). Effect of regeneration heat and energy storage on thermal drying performance in a hardwood solar kiln. *Renewable Energy*, 155 Assess the use of Solar Dryer with Photonic Solar Reflectors and PCMs in Farming Products in the Andean Region.
- Kośny, J. (2015). *PCM-Enhanced Building Components*. Engineering Materials and Processes. USA: Springer International Publishing.
- Lamrani, B., Khouya, A., & Draoui, A. (2019). Energy and environmental analysis of an indirect hybrid solar dryer of wood using TRNSYS software. *Solar Energy*, 183, 132e145.
- Marroquín – Cano, S., Ruiz – Arroyo, J., y Roble – Ocampo, J. (2017). Diseño y construcción de un deshidratador solar indirecto de mango ataulfo por convección forzada. Universidad Politécnica de Chiapas. Universidad Politécnica de Chiapas. Junio 2017 Vol.1 No.2 9-18.
- MathWorks. (2022). Modelo de espacio de estados. Centro de ayuda.

- Micha, D., Höhn, O., Oliva, E., Klinger V., Bett W., Dimroth F. (2018). Development of back side technology for light trapping and photon recycling in GaAs solar cells. *Prog Photovolt Res Appl.* 2018;1–8
- Mujumdar, A. (2015). *Handbook of Industrial Drying.* CRC Press Taylor & Francis Group.
- Murali, G., Mayilsamy, K., & Arjunan, T.V. (2014). An Experimental Study of PCM incorporated Thermosyphon Solar Water heating System. *International Journal of Green Energy.* DOI: 10.1080/15435075.2014.888663.
- Ordóñez, F., Vaca-Revelo, D., López-Villada, J. (2019). Assessment of the Solar Resource in Andean Regions by Comparison between Satellite Estimation and Ground Measurements: Study Case of Ecuador. *Journal of Sustainable Development; Vol. 12, No. 4; 2019.* <https://doi.org/10.5539/jsd.v12n4p62>.
- Pathi, P., Peer, A., and Biswas, R. (2017). Nano-phonic structures for light trapping in ultra-thin crystalline silicon solar cells. *Nanomaterials.* vol. 7, no. 1, pp. 1–16, 2017.
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science,* 65, 67e123.
- Ponce-Jara M.A., Castro M., Pelaez-Samaniego M.R., Espinoza-Abad J.L., Ruiz E. (2018). Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007–2017 decade. *Energy Policy.* 113 (2018) 513–522.
- Prakash, O., Kumar, A. (2021). *Solar Drying Systems.* India: CRC PRes.
- Ringeisen, B., Barrett D., Stroeve P. (2014). Concentrated solar drying of tomatoes. *Energy for Sustainable Development.* Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.006>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability,* 10(1), 191. Retrieved from <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>.
- Shalaby S., Bek M., El-Sebaei, A. (2014). Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.073>.
- Sharma S.D., Sagara, K. (2005). Latent heat storage materials and systems: A Review. *International Journal of Green Energy* 2(1):1-56. DOI:10.1081/GE-200051299
- Sheng, X., Johnson, G., Broderick, Z., Michel, J., and Kimerling C. (2012). Integrated photonic structures for light trapping in thin-film Si solar cells. *American Institute of Physics.* <http://dx.doi.org/10.1063/1.3693613>.

- Treichel, C., & Cruickshank, C. A. (2021). Energy analysis of heat pump water heaters coupled with air-based solar thermal collectors in Canada and the United States. *Energy*, 221, 119801.
- Yu, W., Shen, L., Shen, P., Long, Y., Sun, H., Chen, W., & Ruan, S. (2013). Semitransparent Polymer Solar Cells with 5% Power Conversion Efficiency Using Photonic Crystal Reflector. XXXX American Chemical Society. [dx.doi.org/10.1021/am405274z](https://doi.org/10.1021/am405274z) | ACS Appl. Mater. Interfaces XXXX, XXX, XXX-XXX
- Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. and Mehling, H. (2003) Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)

5 ANEXOS

ANEXO I. Código MATLAB

```
%SECADOR SOLAR CON PCM
clc
clear all;

%CALENTAMIENTO: CAMARA DE SECADO
Ta=15; % temperatura ambiente °C
Ts=56; % temperatura de secado °C
a=0.5; % ancho cámara de secado m
b=0.7; % largo cámara de secado m
c=0.3; % alto cámara de secado m
Ac=a*b*2+a*c*2+c*b*2 % area superficial de la cámara m2
Vc=a*b*c; % volumen de la cámara m3

pa=1.3; % densidad del aire kg/m3
Cpa=1012; % calor específico del aire J/(K*kg)
ma=Vc*pa; % masa del aire kg
mp=2; % masa de parafina kg
Cpp=2400; % calor específico de la parafina J/(K*kg)
CL=142000; % calor latente de fusión de la parafina J/kg

te=6; % tiempo efectivo de radiación solar horas
U=1.3; % coeficiente global de transferencia W/(m2*K)
Perdidas=-U*Ac;
potq=(76) % calor entregado W
dT=(41); % delta consigna de temperatura final °C
%SS
A=[Perdidas/(ma*Cpa+mp*Cpp)];
B=[1/(ma*Cpa+mp*Cpp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1);
step(potq*Gp1)
title('Calentamiento-Control lazo abierto')
ylabel('Diferencia de Temperatura °C')
potqe=(mp*CL)/(3600*2); % calor extra para fundir PCM W
Perdidasw=-Perdidas*dT % calor perdido W
pause;

%EFICIENCIA 1RA LEY
n1=((ma*Cpa+mp*Cpp)*dT)/(potq*3600*6.9)
%EFICIENCIA 2DA LEY
nc=1-((Ta+273)/(Ts+273)); % eficiencia reversible de carnot
n2=n1/nc

%SECADOR SOLAR CON PCM
clc
clear all;

%ENFRIAMIENTO: CAMARA DE SECADO
Ts=56; % temperatura de secado °C
```

```

Ta=20; % temperatura ambiente°C
a=0.5; % ancho cámara de secado m
b=0.7; % largo cámara de secado m
c=0.3; % alto cámara de secado m
Ac=a*b*2+a*c*2+c*b*2 % area superficial de la cámara m2
Vc=a*b*c; % volumen de la cámara m3

pa=1.2; % densidad del aire kg/m3
Cpa=1012; % calor específico del aire J/(K*kg)
ma=Vc*pa; % masa del aire kg
mp=2; % masa de parafina kg
Cpp=2400; % calor específico de la parafina J/(K*kg)
CL=142000; % calor latente de fusión de la parafina J/kg


U=1.3; % coeficiente global de transferencia W/(m2*K)
Perdidas=-U*Ac
Te=(-34); % Temperatura de estabilidad a 20°C

A=[Perdidas/(ma*Cpa+mp*Cpp)];
B=[-Perdidas/(ma*Cpa+mp*Cpp)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
Gp1=GP(1,1);
step(Te*Gp1,28800)
title('Enfriamiento-Control lazo abierto')
ylabel('Diferencia de Temperatura °C')
Perdidasw=Perdidas*Te % calor perdido W
Ca=CL*mp % calor almacenado en pcm J
tdh=Ca/(Perdidasw*3600) % tiempo de descarga PCM en h
pause;

%EXPERIMENTO: ARREGLO1-SIN PCM
x1=[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.5 1 2 3 4 5];
y1=[56 50 45 40 35 30 25 24 24 24 24 24]
plot(x1,y1,'r')
hold on
%EXPERIMENTO: ARREGLO2-CON PCM
x2=[0 0.1 0.16 0.33 0.5 0.66 1 1.25 1.5 1.75 2 3 3.5 4 5];
y2=[56 54 51 47 43 40 36 34 33 32 31 27 26 25 24]
plot(x2,y2,'b')
title('Modelo experimental: Cámara de secado')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [horas]')
legend('A1: sin PCM','A2: con PCM')
hold off


```

ANEXO II. Fabricación del secador solar directo de convección natural.

Secador solar directo de convección natural	
Materiales: Rieles de madera Tabla triplex Lámina de polietileno Malla metálica Bandeja de hierro Resistencia eléctrica (accesorio)	Dimensiones: 800x3x3 cm 240x120 cm 60x40 cm 60x40 cm 0,006 m ³ 100 W
Procedimiento:	
	
1. Cortar los rieles de madera a medida.	2. Armar la estructura soportante.
	
3. Cubrir la estructura con la madera triplex, paredes y fondo, y la parte superior con la lámina de polietileno.	4. Implementar la malla metálica fina como bandeja para el cereal y la malla metálica gruesa para soporte de bandeja de hierro.
Observaciones: Las paredes del secador admiten planchas de espuma Flex para aislar la cámara de secado.	

ANEXO III. Multímetro digital: características

Multímetro Digital	
Marca	: FULGORE (CHI-ISO:9001)
Modelo	: FU1247
Características:	
Voltaje CC	: 2V-1000V
Voltaje CA	: 2V-750V
Corriente CC	: 20mA-10A
Corriente CA	: 20mA-10A
Resistencia	: 200Ω- 20MΩ
Temperatura	: -20°C-1000°C.



ANEXO IV. Plano general del secador solar directo de convección natural.

