



UNIVERSIDAD NACIONAL

“PEDRO RUIZ GALLO”

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Título:

“Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo de secado del café en un secador rectangular en convección forzada”

Autor:

Br. Franklin Colunche Mejia

Asesor:

M.Sc. Jony Villalobos Cabrera

Lambayeque – Perú

2026



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

“Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo de secado del café en un secador rectangular en convección forzada”

Presentado Por:

Br. Franklin Colunche Mejia

Aprobado por el Jurado Examinador

PRESIDENTE : Dr. Amado Aguinaga Paz

SECRETARIO : Dr. Daniel Carranza Montenegro

MIEMBRO : M.Sc. Juan Antonio Tumialan Hinostroza

ASESOR : M.Sc. Jony Villalobos Cabrera

Lambayeque – Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



TESIS

TITULO

“Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo de secado del café en un secador rectangular en convección forzada”

CONTENIDOS

CAPITULO I : PROBLEMA DE LA INVESTIGACION.

CAPITULO II : MARCO TEORICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO.

CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

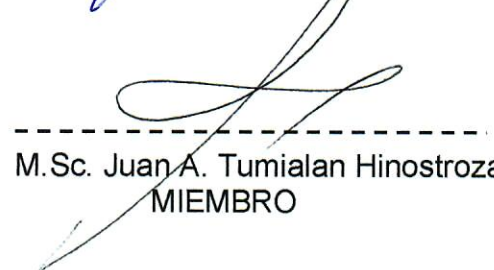
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

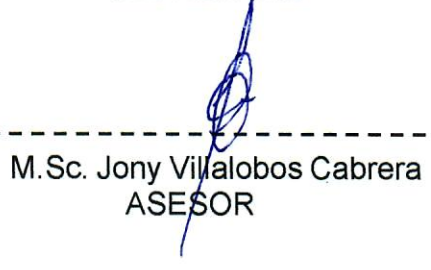
CAPITULO VII: ANEXOS.

AUTOR: Br. Franklin Colunche Mejia


Dr. Amado Aguinaga Paz
PRESIDENTE


Dr. Daniel Carranza Montengro
SECRETARIO


M.Sc. Juan A. Tumialan Hinostroza
MIEMBRO


M.Sc. Jony Villalobos Cabrera
ASESOR

Lambayeque – Perú
2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DECANATO



ACTA DE SUSTENTACION N°0172-2026-FIME



En la ciudad de Lambayeque, siendo las 11:00 a.m. del día viernes 17 de julio 2026. Se reunieron los miembros del jurado, designados mediante Resolución N°130-2026-D-FIME-UNPRG, de fecha 14 de julio 2026, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis, conformado por los siguientes catedráticos:

- | | |
|---|-------------------|
| ▪ Dr. Ing. AMADO AGUINAGA PAZ | PRESIDENTE |
| ▪ Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO | SECRETARIO |
| ▪ M.Sc. Ing. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA | MIEMBRO |
| ▪ M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA | ASESOR |

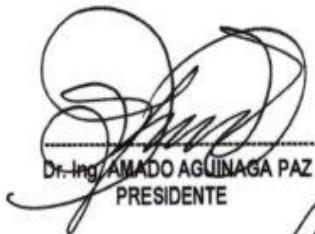
Se recibió la Tesis titulada:

"MODELAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO PARA OPTIMIZAR EL TIEMPO DE SECADO DEL CAFÉ EN UN SECADOR RECTANGULAR EN CONVECCION FORZADA".

Presentada y sustentada por su autor, Bachiller: **COLUNCHE MEJIA FRANKLIN.**

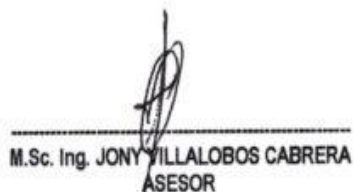
Finalizada la sustentación de la Tesis, el sustentante respondió las preguntas y observaciones de los miembros del jurado examinador, quienes procedieron a deliberar y acordaron otorgar el calificativo de **APROBADO**, Nota **(15)** en la escala vigesimal, mención **REGULAR**. Quedando el sustentante apto para obtener el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las **12.15 pm** del mismo día se da por concluido el acto académico, firmando presente acta el jurado respectivo:


Dr. Ing. AMADO AGUINAGA PAZ
PRESIDENTE


Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO
SECRETARIO


M.Sc. Ing. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA
MIEMBRO


M.Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA
ASESOR

ANEXO 01

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, **M.Sc. Ing. Jony Villalobos Cabrera**, usuario revisor del documento titulado: **“MODELAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO PARA OPTIMIZAR EL TIEMPO DE SECADO DEL CAFÉ EN UN SECADOR RECTANGULAR EN CONVECCIÓN FORZADA”**.

Cuyo autor es, **Colunche Mejía Franklin**, identificado con documento de identidad **N° 75531037** declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **13%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque 07 de agosto del 2026



.....
M.SC. ING. JONY VILLALOBOS CABRERA

DNI: 16699530

ASESOR

Se adjunta:

*Resumen del Reporte automático de similitudes

*Recibo Digital

Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo de secado del café en un secado rectangular en convección forzada

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1 hdl.handle.net

Fuente de Internet

2 JADER RODRIGUEZ CORTINA. "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACION DE PROCESO DE SECADO DE TOMILLO (Thymus Vulgaris L.): APLICACIÓN DE ULTRASONIDO DE POTENCIA Y SECADO INTERMITENTE", 'Universitat Politecnica de Valencia', 2015

Fuente de Internet

3 worldwidescience.org

Fuente de Internet

4 1library.co

Fuente de Internet

5 Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

6 repositorio.utc.edu.ec

Fuente de Internet

7 repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

8 dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

9 Submitted to Account Universidad Mariana

Trabajo del estudiante

10 alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

11 repositorio.uti.edu.ec

Fuente de Internet

12 dokumen.pub

Fuente de Internet

13 repositorio.autonoma.edu.pe

Fuente de Internet

14 repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet


M. Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA
DNI 16699530
ASESOR
Docente Asociado
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

15 "Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en proceso de secado a baja temperatura.", 'Universitat Politecnica de Valencia'

Fuente de Internet

16 tesis.ipn.mx

Fuente de Internet

17 Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

18 www.grafiati.com

Fuente de Internet

19 inm.gov.co

Fuente de Internet

20 Submitted to UC - Presencial

Trabajo del estudiante

21 repositorio.ucp.edu.pe

Fuente de Internet

22 www.criticalhit.co.uk

Fuente de Internet

23 www.editorialgrupo-aea.com

Fuente de Internet

24 Submitted to Instituto Politecnico Nacional

Trabajo del estudiante

25 Submitted to UNAPEC

Trabajo del estudiante

26 Submitted to Universidad Estatal Amazonica-

Trabajo del estudiante

27 Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC

Trabajo del estudiante



M. Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA

DNI 16699530

ASESOR

Docente Asociado

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Excluir citas

Excluir bibliografía

Activo

Activo

Excluir coincidencias

< 15 words



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Franklin Colunche Mejia
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo...
Nombre del archivo: TESIS_FINAL_2026_1.pdf
Tamaño del archivo: 784.72K
Total páginas: 67
Total de palabras: 11,165
Total de caracteres: 64,857
Fecha de entrega: 26-jun-2026 12:30p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2989901029

	UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO" Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	
TESIS Para Optar el Título Profesional de INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA		
Título: "Modelamiento del proceso de secado para optimizar el tiempo de secado del café en un secador rectangular en convección forzada"		
Autor: Br. Franklin Colunche Mejia		
Asesor: M.Sc. Jony Villalobos Cabrera		
Lambayeque – Perú 2026		
		 M. Sc. Ing. JONY VILLALOBOS CABRERA DNI 18699530 Docente Asociado Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, con profundo cariño y gratitud, a mi madre Hilda Mejía, por su amor incondicional, su infinita paciencia y su constante sacrificio, que han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro. A mi familia y amigos, por su apoyo sincero, por acompañarme en cada etapa de este camino y por creer siempre en mí cuando más lo necesité.

Br. Franklin Colunche Mejía

AGRADECIMIENTO

En esta oportunidad quiero agradecer A Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar esta importante etapa de mi formación profesional. A mi madre y a mi familia, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante a lo largo de todo este proceso. A mis docentes, por sus enseñanzas, orientación y valiosos aportes académicos, que contribuyeron de manera significativa a mi formación y al desarrollo de la presente investigación. Finalmente, a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron directa o indirectamente a la realización de esta tesis, mi sincero agradecimiento.

Br. Franklin Colunche Mejia

RESUMEN

Actualmente, en la ciudad de Jaén, muchos productores de café emplean secadores rectangulares por convección forzada de aproximadamente 120 kg de capacidad. El secado constituye una etapa crítica de la cadena productiva, pues condiciona la estabilidad del grano, su conservación y la eficiencia del procesamiento posterior. Sin embargo, en sistemas artesanales y semi-industriales el control de variables operativas como temperatura, velocidad del aire, humedad inicial y espesor de la capa suele ser empírico, generando tiempos prolongados, alto consumo energético y variabilidad en la humedad final. La investigación tuvo como objetivo modelar el proceso de secado del café para optimizar el tiempo de operación. Se identificó que la temperatura y la velocidad del aire son los factores más influyentes al favorecer la transferencia de calor y masa, mientras que la humedad inicial y el espesor de la capa condicionan la duración del proceso. El modelo matemático desarrollado integró los fenómenos térmicos y de difusión de humedad, reproduciendo adecuadamente la cinética de secado y mostrando alta concordancia con los datos experimentales. La optimización permitió estimar el tiempo mínimo necesario para alcanzar la humedad final, mejorando la eficiencia del secador y apoyando la toma de decisiones técnicas en sistemas de convección forzada.

PALABRAS CLAVE: Modelamiento del proceso de secado, optimizar tiempo de secado, secador rectangular en convección forzada.

.

.

ABSTRACT

Currently, in the city of Jaén, many coffee producers use rectangular forced-convection dryers with a capacity of approximately 120 kg. Drying is a critical stage in the production chain, as it determines the stability of the bean, its preservation, and the efficiency of subsequent processing. However, in artisanal and semi-industrial systems, the control of operational variables such as temperature, air velocity, initial moisture content, and layer thickness is often empirical, resulting in prolonged drying times, high energy consumption, and variability in final moisture content. This research aimed to model the coffee drying process to optimize operating time. It was identified that temperature and air velocity are the most influential factors, favoring heat and mass transfer, while initial moisture content and layer thickness determine the duration of the process. The mathematical model developed integrated thermal and moisture diffusion phenomena, accurately reproducing the drying kinetics and showing high agreement with experimental data. The optimization allowed for estimating the minimum time required to reach the final moisture content, improving dryer efficiency and supporting technical decision-making in forced convection systems.

KEYWORDS: Drying process modeling, optimizing drying time, rectangular forced convection dryer.

INDICE

ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	4
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD	5
REPORTE DEL TURNITIN	6
DEDICATORIA.....	8
AGRADECIMIENTO.....	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INDICE	12
INDICE DE TABLAS	14
INTRODUCCION	15
CAPÍTULO I	16
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1. Realidad Problemática	16
1.2. Formulación del problema.....	18
1.3. Delimitación de la investigación	19
1.4. Justificación e importancia de la investigación.....	20
1.5. Limitaciones de la investigación.....	21
1.6. Objetivos de la investigación.....	22
CAPÍTULO II	24
MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. Antecedentes del Estudio	24
2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado	33
A. Proceso de secado del café.....	33
B. Fundamentos del secado por convección forzada.....	33
C. Transferencia de calor en el proceso de secado	33
D. Transferencia de masa y difusión de la humedad	34
E. Cinética de secado	34
F. Modelamiento matemático del proceso de secado.....	34
G. Optimización del tiempo de secado	35

H. Secadores rectangulares de convección forzada	35
CAPITULO III	36
MARCO METODOLÓGICO	36
3.1 Tipo y Diseño de Investigación	36
3.2 Población y muestra	37
3.3 Formulación de la hipótesis	38
3.4 Variables - Operacionalización	38
3.5 Métodos y técnicas de investigación	41
3.6 Descripción de los instrumentos utilizados	41
3.7 Análisis estadístico e interpretación de datos	42
CAPITULO IV	43
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	43
4.1. Variables operativas que influyen en el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada	43
4.2. Desarrollo de um Modelo matemático que describa la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado del café	49
4.3 Validación del modelo propuesto mediante la comparación entre resultados experimentales y datos experimentales obtenidos	52
4.4. Optimización del tiempo de secado del café a partir del modelo desarrollado, bajo condiciones de operación controladas	55
CAPITULO V	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1. Conclusiones	58
5.2. Recomendaciones	60
Bibliografía	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de las Variables	39
Tabla 2: Condiciones del aire de secado	44
Tabla 3: Condiciones operativas del secador.....	44
Tabla 4: Registro experimental simulado del proceso de secado del café en secador rectangular por convección forzada	47
Tabla 5: Registro de valores Observado vs Modelado - Secado de café	53

INTRODUCCION

El tiempo de secado del café es crucial para mantener su calidad y evitar daños irreversibles. A continuación, se presentan algunas citas relevantes que destacan la importancia del tiempo de secado: El secado es una etapa crítica para obtener un producto de alta calidad, ya que cualquier daño ocurrido durante este proceso es irreversible. Esto subraya la necesidad de controlar cuidadosamente el tiempo de secado para evitar daños en el aspecto físico y la composición química del grano (Bravo & Acuña, 2022). El uso de métodos mecánicos puede reducir significativamente el tiempo de secado, pasando de varios días a solo uno o dos días, lo que mejora la calidad del café y aumenta la productividad (Bravo & Acuña, 2022). El tiempo de secado puede variar considerablemente dependiendo del método utilizado. Por ejemplo, el secado natural puede tomar entre 11 y 27 días, mientras que métodos más avanzados pueden reducir este tiempo a menos de un día en algunos casos (Gallego Agudelo, Quinchua, Carlos, & Osorio Pérez, 2023). La optimización del tiempo de secado es esencial para lograr un contenido de humedad final adecuado (entre 10% y 12%) y mantener la calidad del café. Esto requiere un control preciso de factores como la temperatura y la humedad relativa durante el proceso (Henao Arismendy, 2015). Aunque el tiempo de secado puede afectar la composición química del café, algunos estudios indican que ciertos compuestos, como la cafeína y los ácidos clorogénicos, permanecen inalterados durante el proceso. Sin embargo, la acumulación de ácidos grasos puede variar según las condiciones de secado (Henao Arismendy, 2015).

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

La problemática del tiempo de secado del café es un tema crítico en la industria cafetera global, ya que afecta directamente la calidad y la inocuidad del producto. A continuación, se presentan algunas citas que destacan los desafíos asociados con el tiempo de secado del café: El secado del café es un proceso que requiere control para evitar riesgos biológicos y químicos. Una capa de café en secado mayor de 3 cm retarda el proceso y mantiene los granos con un contenido crítico de humedad, lo que puede favorecer la formación de mohos tóxicos como el *Aspergillus ochraceus*, productor de ochratoxina A, una sustancia cancerígena (Puerta Quintero, 2008). Cambios climáticos y condiciones ambientales adversas pueden prolongar el tiempo de secado, lo que aumenta el riesgo de daños físicos y descomposición del grano. Esto subraya la necesidad de tecnologías eficientes para el secado del café (Vega Carpio, 2023). El secado mecánico puede presentar problemas de desuniformidad en el contenido de humedad final del grano, lo que afecta la calidad del café. Esto puede variar dependiendo del método de secado utilizado (López Fonta, 2006). La demora en el tiempo de secado es uno de los problemas más críticos en el proceso de secado del café, ya que puede afectar la productividad y la calidad del producto final (Vega Carpio, 2023).

La problemática del tiempo de secado del café en Perú se centra en varios desafíos que afectan la calidad y la productividad del café. A continuación, se destacan estos

problemas: En Perú, el secado del café se realiza frecuentemente de manera tradicional, exponiendo los granos a la intemperie sobre patios de cemento. Esto los hace susceptibles a la contaminación por polvo, basura, excretas de animales y combustibles, lo que puede generar microorganismos como E. coli y Salmonella, afectando la inocuidad del producto (Huaman Murillo, 2022). El clima y las condiciones ambientales adversas pueden prolongar el tiempo de secado, aumentando el riesgo de daños físicos y descomposición del grano. Esto subraya la necesidad de tecnologías eficientes para el secado del café que puedan mitigar estos efectos (Becerra Montalvo, 2021). La prolongación del tiempo de secado puede resultar en pérdidas económicas significativas debido a la disminución de la calidad del café. En la Planta de Palla Peña, por ejemplo, se reportaron pérdidas económicas debido a tiempos prolongados de secado (Becerra Montalvo, 2021). Para mejorar la calidad y la eficiencia del secado, se busca desarrollar tecnologías como secadores solares que puedan reducir el tiempo de secado y mejorar la uniformidad del contenido de humedad, lo que resulta en cafés de mejor calidad y mayor inocuidad (Huaman Murillo, 2022).

Actualmente en la ciudad de Jaén, muchos de los sembradores de café, emplean para el secado del café un secador rectangular en convección forzada de una capacidad de 120 kg, El proceso de secado del café constituye una de las etapas más críticas en la cadena productiva, ya que de él dependen la estabilidad del grano, su conservación y la eficiencia del procesamiento posterior. En muchos sistemas de secado utilizados a nivel artesanal y semi-industrial, el control de las variables operativas (temperatura del

aire, velocidad del flujo y contenido de humedad del producto) es limitado o empírico, lo que ocasiona tiempos de secado prolongados, consumo energético elevado y variabilidad en la humedad final del café.

El problema que tiene los sembradores de café de esta ciudad, es que cuando emplean estas máquinas secadoras no puedan determinar el tiempo de secado, originando que el café no salga con la humedad que se requiere, esto produce que el café pierda su calidad y aroma, con lo cual su precio cae estrepitosamente.

Los factores que contribuyen a que exista el problema es que los secadores de café no cuenten con Tablas o Gráficos que determinen el tiempo de secado.

Las variables que se investigará son:

Variable Independiente: Modelamiento del proceso de secado

Variable Dependiente: Optimización del tiempo de secado del café

1.2. Formulación del problema

¿Es factible optimizar el tiempo de secado en un secador rectangular en convección forzada para el secado del café mediante el modelamiento del proceso de secado?

1.3. Delimitación de la investigación

La presente investigación se delimita al modelamiento matemático y análisis del proceso de secado del café pergamino realizado en un secador de geometría rectangular que opera bajo el principio de convección forzada de aire caliente.

El estudio se enfoca exclusivamente en la optimización del tiempo de secado, evaluando la influencia de variables operativas tales como temperatura del aire de secado, velocidad del aire y contenido de humedad del grano, manteniendo constantes otros factores como el tipo de café, la geometría del secador y el sistema de calentamiento.

La investigación se desarrolla a escala piloto o experimental, bajo condiciones controladas de laboratorio o planta de procesamiento, sin abordar aspectos relacionados con la calidad sensorial del café, costos económicos, impacto ambiental, ni el diseño estructural del secador.

Asimismo, el estudio se limita al análisis en régimen transitorio del proceso de transferencia de calor y masa, utilizando herramientas de modelamiento matemático y simulación, sin incluir la validación a nivel industrial o la implementación comercial del modelo propuesto.

Finalmente, la investigación se circunscribe a un periodo de evaluación determinado, correspondiente al tiempo de ejecución del estudio, y a un lote específico de café, lo que permite garantizar la repetibilidad y control de las condiciones experimentales.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

A. Justificación técnica

El proceso de secado del café constituye una etapa crítica en la cadena productiva, ya que influye directamente en la eficiencia del procesamiento y en la estabilidad del producto. En muchos sistemas artesanales y semi-industriales, el secado se realiza sin un control adecuado de las variables de operación, lo que genera tiempos prolongados, consumo energético innecesario y variabilidad en los resultados. En ese contexto, el modelamiento del proceso de secado en un secador rectangular por convección forzada permite describir y predecir el comportamiento térmico y de transferencia de masa del café, constituyéndose en una herramienta técnica que facilita la optimización del tiempo de secado bajo condiciones controladas.

B. Justificación científica

Desde el punto de vista científico, la investigación contribuye al desarrollo y validación de modelos matemáticos aplicados a fenómenos de transferencia de calor y masa en productos agrícolas, específicamente en granos de café. El estudio aporta información experimental y resultados de simulación que fortalecen el conocimiento sobre el comportamiento dinámico del secado en sistemas de convección forzada, sirviendo como referencia para futuras investigaciones en procesos similares.

C. Justificación económica

La optimización del tiempo de secado permite reducir el consumo energético, mejorar la utilización del equipo y disminuir los costos operativos del proceso. Al contar con un modelo que permita predecir el tiempo óptimo de secado, los productores y operadores

pueden tomar decisiones técnicas más eficientes, lo que se traduce en ahorros económicos y una mayor competitividad en la cadena productiva del café.

D. Justificación social

El café representa una actividad económica relevante para diversas zonas productoras del país. La mejora de los procesos de secado mediante herramientas técnicas accesibles contribuye a fortalecer las capacidades productivas de pequeños y medianos caficultores, promoviendo procesos más eficientes y estandarizados, lo cual impacta positivamente en la sostenibilidad de la actividad cafetalera.

E. Justificación académica

La investigación se justifica académicamente al integrar conocimientos de ingeniería térmica, operaciones unitarias y modelamiento matemático, aplicados a un problema real de la industria agroindustrial. Asimismo, el estudio puede ser utilizado como material de referencia y apoyo didáctico en cursos de transferencia de calor, procesos agroindustriales y simulación, fortaleciendo la formación profesional del estudiante.

1.5. Limitaciones de la investigación

Entre las principales limitaciones de la investigación se encuentra:

El estudio se limita al secado de café pergamino, por lo que los resultados obtenidos no son directamente extrapolables a otras presentaciones del café ni a otros productos agrícolas.

El modelamiento del proceso se realiza para un secador rectangular con convección forzada, bajo una configuración específica de operación, lo cual restringe la aplicación del modelo a secadores de diferente geometría o principio de funcionamiento.

Las condiciones de operación, tales como temperatura y velocidad del aire de secado, se consideran dentro de rangos controlados, por lo que no se evalúan variaciones ambientales externas como cambios de humedad relativa o temperatura ambiente.

El modelo matemático propuesto se basa en supuestos teóricos (homogeneidad del producto, propiedades físicas constantes, flujo uniforme de aire), los cuales pueden generar desviaciones respecto al comportamiento real del proceso.

La validación del modelo se realiza a escala experimental o piloto, sin contemplar pruebas a escala industrial, lo que limita la generalización de los resultados.

La investigación se centra exclusivamente en la optimización del tiempo de secado, sin analizar en profundidad el impacto del proceso sobre la calidad sensorial, propiedades físico-químicas o valor comercial del café.

Las restricciones de tiempo, recursos técnicos y disponibilidad de equipos de medición pueden influir en la cantidad de ensayos experimentales realizados y, por ende, en la precisión del modelo.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo General

Modelar el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada, con la finalidad de optimizar el tiempo de secado.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Identificar las variables operativas que influyen en el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada.

- Desarrollar un modelo matemático que describa la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado del café.
- Validar el modelo propuesto mediante la comparación entre resultados experimentales y datos experimentales obtenidos.
- Optimizar el tiempo de secado del café a partir del modelo desarrollado, bajo condiciones de operación controladas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Estudio

Internacionales

En Argentina, Hernández Ruiz, Rhenals Julio, & Martínez Guarín, (2023), en la investigación titulada “Modelado cinético del secado de contenido ruminal con efectos multidimensionales”, En el presente trabajo de investigación se realizó un modelo cinético para el proceso de secado de contenido ruminal. A partir de ensayos de secado del contenido ruminal en un equipo TGA, se determinaron las curvas de secado a una tasa de calentamiento de 10 Kmin^{-1} , para posteriormente mediante el modelo de Coats y Redfern, que describe la evolución de la pérdida de humedad en función de la temperatura (el cual hace uso de la ecuación de Arrhenius y un modelo de desaceleración), encontrar los valores de energía de activación, orden de reacción y factor pre exponencial. Una vez obtenido el modelo cinético, se procede a acoplar dicho modelo a la teoría de transferencia de calor en estado transitorio, simulando el comportamiento tanto de la temperatura como de la pérdida de masa dentro de un paralelepípedo rectangular de contenido ruminal en un ambiente cuyas condiciones se asemejan a las de un secador solar ubicado en la ciudad de Montería. De los resultados obtenidos, se reflejó un ajuste del 98,92% de los datos de regresión lineal, y se observó que el perfil de temperaturas y humedad eran similares, lo cual implica que el modelo cinético tuvo buen acople a la transferencia de calor, los resultados experimentales se predicen

adecuadamente con los resultados del modelo. (Hernández Ruiz, Rhenals Julio, & Martínez Guarín, 2023)

En Ecuador, Diego Fernando, (2022), en el trabajo de investigación: “Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada”, La utilización de métodos naturales para el secado del cacao acarrea una prolongación considerable del tiempo necesario para completar dicho proceso, además de presentar un rendimiento térmico bastante deficiente, dado que, por lo general, está condicionado a las variables climáticas. Esto da lugar a un producto final que no cumple con los estándares de calidad deseados, lo que a su vez se traduce en pérdidas económicas significativas para el productor en el momento de comercializar su producto. Por esta razón, surge la imperante necesidad de desarrollar un modelo de secador rectangular para cacao que utilice convección forzada. El objetivo de este diseño es reducir de manera efectiva el tiempo requerido para el secado, así como automatizar todo el proceso y garantizar que el producto final conserve todas sus características de calidad. En el proceso de modelamiento, se consideraron detalladamente una serie de variables esenciales para llevar a cabo la evaluación del tiempo necesario para el secado, así como el análisis del rendimiento térmico involucrado. Entre estas variables se incluyen el flujo másico de aire, el nivel de contenido de humedad del material, la temperatura a la que se lleva a cabo el secado, y la cantidad total de material que se necesita secar. Además, se desarrolló un procedimiento específico para el cálculo que facilitará el diseño y la construcción de un secador con forma rectangular. Gracias

a este enfoque, se procedió a seleccionar diversos sensores y equipos electrónicos que son cruciales para permitir un control adecuado y preciso del proceso, utilizando el algoritmo de control PID para optimizar su funcionamiento. En el contexto del modelamiento, se estableció a través de diversas pruebas experimentales, tanto en condiciones de carga como sin ella, que es fundamental el uso de dispersores de gas. Esto se debe a que estos dispositivos contribuyen significativamente a la optimización del rendimiento térmico del proceso en cuestión. Posteriormente a la fase de modelamiento del secador de tipo rectangular, se presentan a continuación los resultados que se han obtenido a partir de diversas pruebas experimentales. Estas pruebas evidencian tanto la calidad del cacao procesado como el porcentaje de humedad final alcanzado, el cual se sitúa en un notable 7%. Además, se ha logrado un impresionante ahorro de tiempo en el proceso de secado que llega a ser del 97% cuando se compara con el método de secado natural. En la sección final del documento, se detallan de manera exhaustiva las conclusiones extraídas y las recomendaciones formuladas, las cuales se fundamentan en el análisis de la implementación del secador rectangular. (Diego Fernando, 2022)

En Ecuador, Saavedra Moran, (2021), en el trabajo de investigación: “Modelado computacional y validación CFD del proceso de secado de la almendra de cacao por convección forzada”, A raíz del notable aumento en la exportación del cacao producido en nuestro país, que ha continuado incluso en medio de la crisis sanitaria causada por la pandemia del COVID-19, se ha vuelto imperativo y urgente el

desarrollo de equipos de secado que sean no solo altamente eficientes, sino que también se mantengan dentro de un rango de costos accesible. En el contexto del presente proyecto final que corresponde a la graduación, se llevó a cabo un exhaustivo proceso de validación de un modelo que se basa en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar el proceso de secado de cacao mediante un método de convección forzada. El principal objetivo de esta validación es mejorar y optimizar el proceso de diseño de las máquinas utilizadas para el secado del cacao. Se llevó a cabo una simulación detallada empleando el reconocido Software comercial COMSOL MULTIPHYSICS, utilizando para ello una licencia de prueba que ha sido autorizada por la propia empresa desarrolladora de este programa. Se emplearon diversos módulos que simulan el flujo de fluidos, así como la transferencia de calor que ocurre entre diferentes fluidos y entre fluidos y sólidos. También se incluyó el transporte de especies diluidas en este proceso. El modelo que ha sido elaborado y presentado en el presente trabajo se focaliza principalmente en el proceso de difusión del agua, el cual se produce desde el interior o núcleo del producto hacia las áreas periféricas o contornos, así como en la transferencia de masa que ocurre exclusivamente a través de la evaporación en la superficie del mismo. Los resultados obtenidos a través de métodos teóricos y computacionales fueron expuestos de manera visual, utilizando gráficas que ilustran de manera detallada los campos de velocidad del aire que se generan alrededor de la almendra de cacao. Además, estas gráficas también representan la distribución de temperatura en el entorno, así como la variación del contenido de humedad presente en el producto. Se llevó a cabo una comparación detallada entre

los resultados obtenidos de la simulación por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y las pruebas experimentales que se llevaron a cabo en el Centro de Desarrollo y Transferencia de Tecnología (CDTS) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Los márgenes de error más altos que se han logrado en las comparaciones son de un rango que varía entre el 23% y el 41.4% cuando se confrontan con los resultados obtenidos a través de experimentos de secado realizados en el cacao fino y de aroma. Por otro lado, al comparar con los resultados de los experimentos de secado realizados en el cacao CCN51, estos márgenes de error se encuentran entre el 61.8% y el 64.9%. No obstante, el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es capaz de predecir adecuadamente los resultados cualitativos relacionados con el fenómeno físico del secado del grano de cacao. Este modelo ilustra de manera efectiva cómo disminuye la concentración de humedad a lo largo de un periodo específico. En otras palabras, las curvas de secado que se obtienen a través de este modelo son comparables a aquellas que se han determinado en los experimentos realizados previamente. (Saavedra Moran, 2021)

A nivel Nacional

En Piura, Casaverde Pacherez, (2022), en su trabajo de investigación “Modelación y diseño de un sistema de control automático para tratamiento DIC en un proceso de secado”, Este trabajo de investigación se origina como una fase adicional que se encuentra dentro del marco del proyecto titulado “Desarrollo de un prototipo de deshidratador de frutas utilizando la tecnología de descompresión instantánea

controlada (DIC), en combinación con microondas, con el objetivo de añadir un valor significativo a los productos agroindustriales que provienen de la región”. El proyecto que se menciona en este contexto se está llevando a cabo en el marco de una línea de investigación dedicada a la optimización y mejora de procesos. En este sentido, la Universidad de Piura asume un firme compromiso con la promoción y el avance de la investigación, así como con la ejecución de proyectos que tengan como objetivo principal fomentar el desarrollo no solo del país, Perú, sino también, y de forma preponderante, de nuestra región específica. La relevancia de este estudio se encuentra en el hecho de que los métodos de secado que se emplean en la actualidad no garantizan que el producto final mantenga unas características organolépticas de alta calidad, tales como una textura suave, una adecuada expansión y un color atractivo. Adicionalmente, es importante destacar que estos prolongados períodos de secado pueden resultar en una pérdida significativa de los nutrientes presentes en el producto. En contraposición, es fundamental destacar que los métodos de secado que se basan en tecnologías convencionales suelen resultar en un considerable gasto energético, lo cual podría incrementar significativamente los costos asociados a la producción. De igual manera, la ausencia de un control adecuado sobre el proceso puede provocar daños estructurales que resultan ser irreversibles en la composición celular de los alimentos. En vista de esta situación particular, el presente trabajo de investigación se propone optimizar el rendimiento de los diversos procesos involucrados en la deshidratación de frutas, lo que a su vez tendrá un impacto positivo en la calidad final de los productos obtenidos. Para alcanzar este objetivo, se contempla la

elaboración de un modelo que represente de manera precisa el proceso de secado, teniendo en cuenta cuidadosamente los mecanismos de transferencia tanto de materia como de energía. Después de llevar a cabo este modelado, se prevé también el desarrollo de un sistema de control eficiente que se encargue de gestionar el proceso conocido como descompresión instantánea controlada (DIC), buscando así mejorar aún más los resultados en la deshidratación. Por otra parte, es importante destacar que el proceso de secado tradicional de un producto específico demanda un modelamiento particular diseñado exclusivamente para ese propósito. No obstante, al implementar la innovadora tecnología DIC, es posible adaptar y utilizar un modelo que puede ser aplicado a una amplia variedad de productos y contextos de uso, lo que amplía considerablemente sus aplicaciones y beneficios. (Casaverde Pacherez, 2022)

En Piura, Castillo Ruesta, (2023), en su trabajo de investigación denominado “Diseño de un sistema para obtención de agua caliente sanitaria, con energía solar, para camal de beneficio de aves en Piura”, Con el propósito de fomentar y hacer más accesibles los beneficios asociados al uso de la energía solar térmica, el principal objetivo de este ambicioso proyecto es desarrollar un sistema innovador que permita producir agua caliente aprovechando la energía solar. Esta agua caliente estará destinada a ser utilizada en un camal, que se dedica al procesamiento de aves de corral, ubicado en la ciudad de Piura. Para llevar a cabo los cálculos necesarios, se han considerado cuidadosamente los criterios establecidos por el Centro Español de Estudios de la Energía Solar, conocido como

CENSOLAR. Esto ha permitido obtener información valiosa sobre la demanda energética del proyecto, así como calcular la superficie coleccionadora total que se requiere y determinar el número de colectores que serán necesarios. Todo esto se ha realizado teniendo en cuenta las particularidades del clima local en la región donde se está desarrollando el proyecto. De acuerdo con los cálculos exhaustivos que han sido llevados a cabo, es necesario incorporar un total de 20 colectores planos del modelo Topson F3-1. Esta cantidad representa una superficie total de captación que alcanza los 39,20 metros cuadrados, y es esencial para poder satisfacer adecuadamente la demanda de agua caliente que se requiere en el camal que se está analizando. Asimismo, se llegó a la conclusión de que es imperativo contar con un sistema de apoyo que sea alimentado por gas licuado de petróleo (GLP) con el fin de asegurar que el agua utilizada en el proceso mantenga una temperatura constante y adecuada. En el proceso de evaluación llevado a cabo, se logró identificar que la contribución proveniente de la energía solar representa un impresionante porcentaje del 96,57%. Esto permitió proceder con un análisis tanto económico como energético, el cual resultó en conclusiones altamente positivas en lo que respecta al ahorro en el consumo de energía y la reducción de emisiones de dióxido de carbono. Además, se determinó que el tiempo estimado para recuperar la inversión inicial sería de aproximadamente 3 años y 9 meses. (Castillo Ruesta, 2023)

En Piura, Elías Chiyón, Ocaña Huamán, & Ortiz Monzón, 2020, en su trabajo de investigación denominado “Modelado del proceso de transferencia de calor y masa

durante el secado por convección de frutas”, El proceso de secar frutas, que consiste en eliminar la humedad de estas para preservarlas, es una técnica de deshidratación que ha sido utilizada por las civilizaciones desde épocas muy remotas. A lo largo de los años, este método ha evolucionado y se ha perfeccionado en conjunto con los avances y progresos tecnológicos que la humanidad ha logrado alcanzar. Dentro de las diversas ventajas que se pueden obtener al implementar este método, se destacan aspectos fundamentales como la prolongación de la vida útil de los productos, la disminución del peso y del volumen de los mismos, lo que a su vez contribuye a la mejora de los procesos tanto de transporte como de almacenamiento, optimizando así la eficiencia general. Se trata de un enfoque bastante complicado que requiere la integración de varios procesos, incluyendo la transferencia de calor y de masa, así como la alteración de las propiedades físicas del material y la reducción de su volumen. Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto, se optó por implementar un método específico que consiste en el secado de frutas utilizando aire caliente a una temperatura controlada de 60 grados Celsius. (Elías Chiyón, Ocaña Huamán, & Ortiz Monzón, 2020)

A nivel Local

No existen investigaciones relacionadas al tema de investigación.

2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado

A. Proceso de secado del café

El secado del café es una operación unitaria fundamental en la etapa de poscosecha, cuyo objetivo principal es reducir el contenido de humedad del grano hasta niveles que garanticen su estabilidad física y química durante el almacenamiento. Un secado inadecuado puede provocar deterioro del producto, desarrollo de microorganismos y pérdidas económicas.

El café pergamino presenta una estructura higroscópica, por lo que el proceso de secado depende tanto de las condiciones del aire como de las propiedades físicas del grano.

B. Fundamentos del secado por convección forzada

El secado por convección forzada consiste en la remoción de humedad mediante la circulación controlada de aire caliente sobre la superficie del producto. Este mecanismo involucra simultáneamente fenómenos de **transferencia de calor** desde el aire al sólido y **transferencia de masa** desde el interior del grano hacia el aire circundante.

La eficiencia del proceso está influenciada por variables como la temperatura del aire, velocidad del flujo, humedad relativa y tiempo de exposición.

C. Transferencia de calor en el proceso de secado

La transferencia de calor durante el secado del café ocurre principalmente por convección. El calor suministrado permite la evaporación de la humedad contenida en el grano. El análisis térmico se basa en principios de la termodinámica y leyes

fundamentales como la **ley de enfriamiento de Newton**, que describe el flujo de calor entre el aire y el producto.

La correcta estimación de los coeficientes de transferencia de calor es esencial para el desarrollo de modelos confiables del proceso.

D. Transferencia de masa y difusión de la humedad

La transferencia de masa durante el secado del café se produce por difusión de la humedad desde el interior del grano hacia su superficie. Este fenómeno puede ser descrito mediante la **ley de Fick**, la cual relaciona el flujo de masa con el gradiente de concentración.

La resistencia interna a la difusión y las características físicas del grano influyen significativamente en la velocidad de secado.

E. Cinética de secado

La cinética de secado describe la variación del contenido de humedad del café en función del tiempo. Generalmente, el proceso presenta una etapa de velocidad constante y una etapa de velocidad decreciente, siendo esta última predominante en el secado de granos.

El análisis cinético permite establecer curvas de secado y determinar tiempos óptimos de operación bajo diferentes condiciones.

F. Modelamiento matemático del proceso de secado

El modelamiento matemático del secado del café consiste en la formulación de ecuaciones que representan los fenómenos de transferencia de calor y masa. Estos modelos pueden ser empíricos, semiempíricos o teóricos, y permiten simular el comportamiento del proceso bajo distintas condiciones operativas.

El uso de modelos matemáticos facilita la predicción del tiempo de secado y la evaluación de escenarios de operación sin necesidad de múltiples ensayos experimentales.

G. Optimización del tiempo de secado

La optimización del tiempo de secado busca minimizar la duración del proceso sin comprometer la estabilidad del producto. A partir del modelo matemático, es posible identificar combinaciones óptimas de temperatura y velocidad del aire que permitan mejorar la eficiencia del secado.

Este enfoque contribuye a una mejor utilización del equipo y a la reducción del consumo energético.

H. Secadores rectangulares de convección forzada

Los secadores rectangulares de convección forzada se caracterizan por una geometría simple que facilita el flujo uniforme del aire sobre el producto. Su diseño permite un control adecuado de las variables de operación, lo que los convierte en una alternativa viable para estudios experimentales y aplicaciones a pequeña y mediana escala.

.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y Diseño de Investigación

A. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema práctico relacionado con la optimización del proceso de secado del café mediante el desarrollo de un modelo matemático que permita mejorar la eficiencia del secador y reducir el tiempo de operación. Los resultados obtenidos tienen una aplicación directa en sistemas de secado utilizados por productores de café.

Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la medición y análisis de variables físicas del proceso, como temperatura del aire, velocidad del flujo, contenido de humedad y tiempo de secado, utilizando métodos matemáticos y análisis estadístico para la validación del modelo.

B. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es **no experimental de tipo descriptivo–correlacional con apoyo experimental**.

Descriptivo, porque permite caracterizar el comportamiento del proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada, identificando las variables que intervienen en la transferencia de calor y masa.

Correlacional, porque analiza la relación existente entre las variables operativas (temperatura, velocidad del aire, humedad inicial del café y espesor de la capa) y el tiempo de secado.

Apoyo experimental, ya que se realizan mediciones y registros durante el proceso de secado para obtener datos que permitan ajustar y validar el modelo matemático desarrollado.

3.2 Población y muestra

La población de estudio está constituida por el proceso de secado del café pergamino realizado en secadores de convección forzada de geometría rectangular, utilizados en sistemas de secado experimental o semi-industrial.

Asimismo, desde el punto de vista material, la población comprende todos los lotes de café pergamino que pueden ser sometidos al proceso de secado bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad del aire.

La muestra está conformada por un lote específico de café pergamino, seleccionado de manera intencional, que es sometido a ensayos experimentales de secado en un secador rectangular de convección forzada, bajo diferentes condiciones operativas previamente establecidas.

La selección de la muestra es no probabilística y por conveniencia, debido a la naturaleza experimental del estudio y a las limitaciones de tiempo y recursos. El número de ensayos realizados se determina en función del diseño experimental y de la repetibilidad de los resultados obtenidos.

3.3 Formulación de la hipótesis

El modelamiento del proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada permite optimizar el tiempo de secado bajo condiciones de operación controladas.

3.4 Variables - Operacionalización

Con el propósito de llevar a cabo la prueba del estudio de investigación, se establecieron dos variables específicas que servirían para la operacionalización del mismo:

Variable Independiente: Modelamiento del proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada.

Variable Dependiente: Tiempo de secado del café

Tabla 1: Operacionalización de las Variables

TIPO	NOMBRE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
INDEPENDIENTE	Modelamiento del proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada	El modelamiento del proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada es la representación matemática y teórica de los fenómenos de transferencia de calor y masa que ocurren durante la eliminación de humedad del café, considerando las condiciones de operación y las características del sistema de secado (Díaz Delgado, 2019)	El modelamiento del proceso de secado del café se operacionaliza mediante la formulación, simulación y validación de un modelo matemático que relaciona variables como la temperatura y velocidad del aire con el comportamiento de la humedad del café en función del tiempo, utilizando datos experimentales obtenidos en un secador rectangular de convección forzada.	Variables de operación	• Temperatura del aire de secado (°C) • Velocidad del aire (m/s)	Razón o proporción
				Transferencia de calor	• Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$) • Flujo de calor convectivo	
				Transferencia de masa	• Coeficiente de transferencia de masa • Tasa de remoción de humedad	
				Desempeño del modelo	• Error entre datos experimentales y simulados • Coeficiente de correlación del modelo	

DEPENDIENTE	Tiempo de secado del café	El tiempo de secado del café es el intervalo de tiempo requerido para reducir el contenido de humedad del café desde un valor inicial hasta un nivel final seguro, mediante la aplicación de un proceso de secado controlado, garantizando la estabilidad física del producto. (Guzmán Hernández, 2019)	El tiempo de secado del café se mide como el tiempo total transcurrido, expresado en minutos u horas, desde el inicio del proceso de secado en el secador rectangular por convección forzada hasta que el café alcanza el contenido de humedad final establecido, determinado mediante mediciones periódicas de humedad. .	Duración del proceso	• Tiempo total de secado (h) • Tiempo por etapa de secado	Razón o proporción
				Cinética de secado	• Velocidad de secado • Pendiente de la curva de secado	
				Condición final del producto	• Contenido final de humedad (%) • Uniformidad del secado	

Nota: Elaborado por el autor

3.5 Métodos y técnicas de investigación

3.5.1 Método de investigación

Para el presente trabajo, se utilizó el método inductivo, que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares. Se trata del método científico más usual, en el que pueden distinguirse cuatro pasos esenciales: la observación de los hechos para su registro; la clasificación y el estudio de estos hechos; la derivación inductiva que parte de los hechos y permite llegar a una generalización; y la contrastación.

3.5.2 Técnicas de investigación

En este proyecto se han utilizado las siguientes técnicas de investigación:

A. Análisis de Documentos

Esta técnica nos permite analizar libros, tesis, la normatividad vigente, revistas, etc.

3.6 Descripción de los instrumentos utilizados

Los métodos que se emplearán para la recolección de datos en el contexto del presente trabajo de investigación son los siguientes:

A. Guía de análisis de documentos

Se llevará a cabo el diseño de un formulario o ficha en el cual se registrarán de manera detallada los datos más relevantes de la fuente bibliográfica que se ha examinado. Esto incluirá información como el nombre del autor, el título de

la obra, la edición en la que se basa, el número de páginas que se han consultado, entre otros aspectos importantes relacionados con la fuente analizada.

3.7 Análisis estadístico e interpretación de datos

Para el análisis de los diferentes datos obtenidos se utilizó la estadística descriptiva, la cual sirve para analizar el comportamiento de una variable en el Sistema; donde se aplicará: La media, el promedio, valores máximos y mínimos, etcétera. Por ejemplo, esto se realizó con la finalidad de determinar la máxima demanda, el factor de potencia mínimo registrado en el periodo analizado y otros valores más.

Por ejemplo, la utilización del software Microsoft office Excel permitió el análisis de los diferentes datos evaluados para el presente estudio.

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Variables operativas que influyen en el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada

Para el cumplimiento de este objetivo se realizará la identificación y análisis de las principales variables de operación que intervienen en el proceso de secado del café, considerando el comportamiento térmico y de transferencia de masa en el secador.

Las variables operativas a evaluar son:

- Temperatura del aire de secado (°C)
- Velocidad del aire (m/s)
- Humedad inicial del café (%)
- Humedad relativa del aire (%)
- Tiempo de exposición al secado (h)
- Espesor de la capa de café en el secador (cm)

La identificación se efectuará mediante:

- a. Revisión teórica de procesos de secado en granos agrícolas.
- b. Observación del funcionamiento del secador rectangular por convección forzada.
- c. Registro experimental de parámetros durante los ensayos de secado.
- d. Análisis de la influencia de cada variable sobre la reducción de humedad del café.

Este análisis permitirá establecer las variables críticas que serán consideradas en el modelamiento matemático y en la optimización del tiempo de secado del proceso.

A. Observación del funcionamiento del secador rectangular por convección forzada

a. Condiciones del aire de secado

Tabla 2: Condiciones del aire de secado

Parámetro	Valor supuesto	Unidad
Temperatura del aire de secado	55	°C
Velocidad del aire	2,5	m/s
Humedad relativa del aire	60	%
Caudal de aire	1,8	m ³ /s

Nota: Elaboración propia

b. Condiciones operativas del secador

Tabla 3: Condiciones operativas del secador

Parámetro	Valor supuesto	Unidad
Tipo de flujo de aire	Horizontal forzado	—
Tiempo estimado de secado	7	h
Potencia del sistema de calentamiento	5	kW
Área útil del secador	2,0 × 1,5	m
Tipo de energía	Eléctrica	

Nota: Elaboración propia

Observaciones operativas

- El aire caliente es distribuido mediante ventilación mecánica uniforme.
- El secado se desarrolla en régimen no estacionario, con reducción progresiva del contenido de humedad.
- Se evidencia mayor velocidad de secado durante las primeras horas del proceso.
- La etapa predominante corresponde al periodo de velocidad decreciente.

B. Simulación de la cinética del secado

a. Procedimiento experimental del secado de café en secador rectangular por convección forzada

a.1. Instrumentos y equipos

- Secador rectangular de convección forzada (cámara + ventilador + sistema de calentamiento).
- Balanza digital (≥ 0.01 kg de resolución) para masa del lote y/o muestras.
- Termómetro / termopares tipo K con indicador o datalogger para temperatura del aire y, si aplica, del producto.
- Anemómetro para velocidad del aire (m/s) en la zona de secado.
- Higrómetro o sensor HR para humedad relativa del aire (%).
- Medidor de humedad para granos (o método gravimétrico en estufa) para humedad del café.
- Cronómetro.
- Bandejas y recipientes para muestreo; espátula/guantes para manipulación.

a.2. Pasos (metodología experimental)

Acondicionamiento del equipo

- Verificar limpieza del secador y libre circulación del aire.
- Encender ventilador y sistema de calentamiento.
- Estabilizar el secador a la condición de trabajo (**55 °C y 2,5 m/s**) durante **10–15 min.**

Calibración y verificación de instrumentos

- Cero de balanza.

- Verificación de lectura de termómetros/termopares.
- Medición de velocidad de aire con anemómetro.
- Medición de HR ambiente y HR en cámara.

Preparación del café

- Seleccionar y homogeneizar el lote de café pergamino.
- Determinar humedad inicial M_i con medidor de humedad o con el método gravimétrico.
- Registrar masa inicial del lote (120 kg).
- Distribuir el café en bandejas formando una capa uniforme (6 cm), evitando acumulaciones.

Inicio del ensayo

- Colocar bandejas dentro del secador.
- Iniciar el cronómetro ($t = 0$).
- Registrar condiciones iniciales: T aire, v aire, HR, masa y humedad.

Monitoreo durante el secado (muestreo y registros)

- Mantener constantes las condiciones de operación.
- Realizar muestreo del café en puntos representativos (centro y extremos de bandeja) para reducir sesgo.
- Registrar datos según la frecuencia establecida (ver apartado siguiente).

Criterio de finalización

- Finalizar cuando el café alcance la humedad objetivo (12% b.h.) con lectura estable en dos mediciones consecutivas.

Registro final y cierre

- Registrar tiempo total de secado, condiciones finales y masa final del lote.
- Dejar enfriar el producto a temperatura ambiente y almacenar en recipientes adecuados.
- Ordenar y respaldar los datos para el ajuste/validación del modelo.

a.3. Frecuencia de medición

- Temperatura del aire (°C): cada 10–15 min (si hay dataloggerb realizar el registro continuo).
- Velocidad del aire (m/s): cada 30–60 min (cuando se ajuste el ventilador).
- Humedad relativa (HR %): cada 30 min.
- Masa del lote o bandejas (kg): cada 30 min (12 mediciones en 7 h).
- Humedad del café (% b.h.): cada 30 min (si se usa medidor rápido), o cada 60 min si se usa método gravimétrico por estufa.
- Observaciones cualitativas: en cada medición (uniformidad, cambios en flujo, acumulación, etc.).

Tabla 4: Registro experimental simulado del proceso de secado del café en secador rectangular por convección forzada

Medición	Tiempo (h)	Temp. aire (°C)	Vel. aire (m/s)	MR (-)	Humedad M (% b.h.)	Masa total del lote (kg)	Tasa de secado dM/dt (% b.h./h)
1	0,0	55	2,5	1,000	45,00	120,00	0,00
2	0,5	55	2,5	0,898	42,72	115,22	-5,85
3	1,0	55	2,5	0,766	39,51	109,10	-6,86
4	1,5	55	2,5	0,637	35,95	102,83	-7,21
5	2,0	55	2,5	0,520	32,38	97,32	-7,10
6	2,5	55	2,5	0,415	28,93	92,67	-6,64
7	3,0	55	2,5	0,330	25,63	88,68	-6,00
8	3,5	55	2,5	0,260	22,61	85,55	-5,29
9	4,0	55	2,5	0,200	20,16	83,29	-4,67
10	5,0	55	2,5	0,116	16,20	79,85	-3,21
11	6,0	55	2,5	0,065	13,60	77,63	-2,05
12	7,0	55	2,5	0,036	12,00	76,30	-1,38

Nota: Elaboración propia

MR es la razón de humedad ($MR = (M_{db} - M_{e,db}) / (M_{i,db} - M_{e,db})$).

La tasa de secado negativa indica disminución del contenido de humedad.

Análisis e interpretación de resultados

Los resultados de la Tabla 4 evidencian una disminución progresiva de la humedad del café desde 45% b.h. hasta $\approx 12\%$ b.h. en un tiempo total de 7 horas, bajo condiciones de convección forzada (55 °C y 2,5 m/s). La razón de humedad (MR) decrece de 1,000 a 0,036, confirmando el carácter transitorio del proceso y la pérdida sostenida de humedad.

La mayor tasa de secado se observa aproximadamente entre 1,0 y 2,0 h, alcanzando valores cercanos a -7 % b.h./h, lo que corresponde a una etapa inicial donde el gradiente térmico y de humedad favorece la evaporación. Posteriormente, la tasa de secado disminuye gradualmente hasta valores del orden de -1.38 % b.h./h al finalizar el proceso, lo que indica el predominio del periodo de velocidad decreciente, típico en productos granulares, donde la difusión interna de humedad se convierte en el mecanismo limitante.

Asimismo, la masa total del lote disminuye de 120 kg a $\approx 76,3$ kg, debido a la remoción de agua, lo cual confirma la coherencia del balance de masa durante el secado. En conjunto, estos resultados simulados permiten describir la cinética del proceso y constituyen una base para la validación del modelo y la posterior optimización del tiempo de secado.

4.2. Desarrollo de un Modelo matemático que describa la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado del café

A. Variables y conversiones (base húmeda)

$M(x, t)$: humedad en base húmeda (fracción, 0–1). Si la tienes en %, usa $M_{\%}/100$.

Conversión a base seca (solo para cálculo interno del modelo):

$$X(x, t) = \frac{M(x, t)}{1 - M(x, t)} \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}} \right)$$

Inversa:

$$M(x, t) = \frac{X(x, t)}{1 + X(x, t)}$$

Espesor de capa: $L = 0,06 \text{ m}$, con $x \in [0, L]$.

B. Modelo de transferencia de masa (difusión interna)

Se modela la difusión de humedad dentro de la capa mediante Fick (en base seca, porque es la forma estándar):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

Condiciones de frontera (convección de masa en superficies)

En $x = 0$ y $x = L$:

$$-D_{eff} \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_s = h_m (X_s - X_e)$$

Donde:

D_{eff} = difusividad efectiva (m^2/s)

h_m = coeficiente convectivo de masa (m/s)

X_e = humedad de equilibrio (base seca), función de T_a y RH (puedes asumir constante por ensayo)

Condición inicial

$$X(x, 0) = X_0$$

con $X_0 = \frac{M_0}{1-M_0}$ (si M_0 está en fracción b.h.).

Importante: Tus resultados finales los reportas en % b.h. usando $M = \frac{X}{1+X} \cdot 100$.

C. Modelo de transferencia de calor (conducción interna)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

donde $\alpha_{eff} = k_{eff}/(\rho c_p)$.

Condiciones de frontera (convección + evaporación)

En $x = 0$ y $x = L$:

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \big|_s = h(T_a - T_s) - \lambda \dot{m}_w''$$

h : coef. convectivo de calor (W/m^2K)

λ : calor latente (J/kg)

$\dot{m}_w''$: flujo másico evaporado (kg/m^2s)

Se acopla con la masa usando el flujo difusivo en la superficie:

$$\dot{m}_w'' \approx \rho_{ss} \left(-D_{eff} \frac{\partial X}{\partial x} \big|_s \right)$$

(ρ_{ss} : densidad aparente de sólido seco o factor equivalente según tu definición experimental).

Condición inicial:

$$T(x, 0) = T_0$$

D. Modelo “capa delgada” (la prioridad es optimizar tiempo)

Como no se necesita el perfil interno $X(x, t)$, entonces se hará uso de una ecuación práctica para ajustar tus datos en % b.h., para lo cual se trabajará con M y M_e (en fracción b.h.):

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k t^n)$$

De donde:

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e) \exp(-k t^n)$$

y en porcentaje:

$$M_{\%}(t) = 100 M(t)$$

Tiempo para alcanzar una humedad objetivo M_f :

$$t_f = \left[\frac{-\ln \left(\frac{M_f - M_e}{M_0 - M_e} \right)}{k} \right]^{1/n}$$

Esto te sirve directo para la optimización del tiempo de secado.

Parámetros a estimar con tus mediciones

Con la tabla experimental (t_i, M_i) en % b.h.:

Se pasa a fracción: $M_i = M_{i\%}/100$

Se estima M_e (puede asumirse 0,10 si 10% b. h., o estimarse por equilibrio).

Calcular $MR_i = \frac{M_i - M_e}{M_0 - M_e}$

Se ajusta k, n minimizando:

$$SSE = \sum_i (MR_i - e^{-kt_i^n})^2$$

Validar con RMSE y R^2 .

4.3 Validación del modelo propuesto mediante la comparación entre resultados experimentales y datos experimentales obtenidos

Para validar el modelo propuesto tomaremos los datos registrados experimentalmente presentados en la Tabla 4.

Con las 12 mediciones simuladas (cada 0,5 h) y trabajando en base húmeda, ajustamos el modelo:

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k t^n)$$

Parámetros ajustados (ensayo: $T = 55^\circ C$, $v = 2,5 \text{ m/s}$, $L = 0,06 \text{ m}$)

Tomando $M_0 = 45\% \text{ b.h.} \Rightarrow M_0 = 0,45$ y $M_e = 10\% \text{ b.h.} \Rightarrow M_e = 0,10$:

- $k = 0,172 \text{ h}^{-n}$
- $n = 1,43$

Ecuación final en % base húmeda

$$M_{\%}(t) = 100[0,10 + (0,45 - 0,10)\exp(-0,172 t^{1.43})]$$

Validación del ajuste (sobre las 12 mediciones)

- $R^2 = 0,9996$
- $RMSE = 0,20\% \text{ b.h.}$

Tiempo estimado para alcanzar 12%b.h.

$$t_f = \left[\frac{-\ln \left(\frac{M_f - M_e}{M_0 - M_e} \right)}{k} \right]^{1/n} \Rightarrow t_{12\%} \approx 7,18 \text{ h}$$

Tabla 5: Registro de valores Observado vs Modelado - Secado de café

Tiempo (h)	Humedad observada (% b.h.)	Humedad modelada (% b.h.)	Error (% b.h.)
0,0	45,0	45,0	0,0
0,5	42,72	42,84	-0,12
1,0	39,51	39,47	0,04
1,5	35,95	35,74	0,21
2,0	32,38	32,02	0,36
2,5	28,93	28,5	0,43
3,0	25,63	25,3	0,33
3,5	22,61	22,47	0,14
4,0	20,16	20,04	0,12
5,0	16,2	16,28	-0,08
6,0	13,6	13,76	-0,16
7,0	12,0	12,17	-0,17

Nota: Elaboración propia

La comparación entre los valores de humedad observados experimentalmente y los estimados mediante el modelo matemático tipo Page evidencia una alta concordancia durante todo el proceso de secado del café en el secador rectangular por convección forzada. Los errores obtenidos son reducidos y se mantienen dentro de un rango

aproximado de $\pm 0,4$ % en base húmeda, lo cual indica una adecuada capacidad predictiva del modelo bajo las condiciones operativas evaluadas.

El comportamiento de la curva modelada reproduce de manera consistente la tendencia decreciente del contenido de humedad del café a lo largo del tiempo, especialmente en la etapa predominante de velocidad decreciente del secado, característica de productos granulares como el café pergamino. Esto confirma que el modelo describe correctamente el fenómeno de transferencia de masa asociado al proceso de evaporación interna y superficial.

Asimismo, el alto coeficiente de determinación obtenido en el ajuste del modelo (R^2 cercano a la unidad) y el bajo error cuadrático medio (RMSE reducido) demuestran la validez estadística del modelo para representar la cinética de secado del café en las condiciones experimentales establecidas.

En consecuencia, el modelo matemático desarrollado resulta adecuado y confiable para predecir el comportamiento del proceso de secado, permitiendo estimar el contenido de humedad del café en función del tiempo y evaluar escenarios operativos orientados a la optimización del tiempo de secado. Estos resultados respaldan su aplicación como herramienta de análisis y apoyo en la toma de decisiones para la operación del secador bajo condiciones de convección forzada.

4.4. Optimización del tiempo de secado del café a partir del modelo desarrollado, bajo condiciones de operación controladas

A partir del modelo desarrollado: base húmeda, la optimización del tiempo de secado consiste en encontrar el menor tiempo t , tal que el café alcance la humedad objetivo M_f sin cambiar las condiciones de operación (controladas).

A. Modelo calibrado (condiciones controladas)

Para $T = 55^\circ C$, $v = 2,5 \text{ m/s}$, $L = 0,06 \text{ m}$, $M_0 = 45\% \text{ b.h.}$, $M_e = 10\% \text{ b.h.}$:

$$M_{\%}(t) = 100[0,10 + (0,45 - 0,10)\exp(-0,172 t^{1,43})]$$

B. Formulación de la optimización

Objetivo: minimizar el tiempo de secado

$$\min t$$

Restricción (calidad operativa): alcanzar humedad final requerida

$$M_{\%}(t) \leq M_{f\%}$$

donde típicamente $M_{f\%} = 12\% \text{ b.h.}$

C. Tiempo óptimo (solución analítica)

Despejando t del modelo:

$$t_f = \left[\frac{-\ln \left(\frac{M_f - M_e}{M_0 - M_e} \right)}{k} \right]^{1/n}$$

Sustituyendo $M_f = 0,12$, $M_e = 0,10$, $M_0 = 0,45$, $k = 0,172$, $n = 1,43$:

$$t_{opt}(12\%) \approx 7,18 \text{ h}$$

Interpretación: Bajo estas condiciones controladas, el tiempo mínimo para alcanzar 12% b.h. es aproximadamente 7 h 11 min.

D. Resultado práctico para operación

- Recomendación operativa: programar el secado a 7,2 h (verificar con 1 medición final de humedad).
- Margen de seguridad (opcional): si deseas asegurar el 12% pese a variaciones, usar 7,3 – 7,4 h.

E. Tabla rápida de tiempo óptimo para distintas metas (útil en tesis)

Con el mismo modelo:

- $M_f = 13\% \rightarrow t \approx 6,05 \text{ h}$
- $M_f = 12\% \rightarrow t \approx 7,18 \text{ h}$
- $M_f = 11.5\% \rightarrow t \approx 7,74 \text{ h}$

El tiempo óptimo obtenido evidencia que el secado del café en condiciones de convección forzada presenta una reducción progresiva de la humedad dominada por la etapa de velocidad decreciente, donde la difusión interna del agua constituye el principal mecanismo de transferencia de masa.

El modelo matemático permitió predecir con precisión el comportamiento del proceso y estimar el tiempo mínimo de operación sin comprometer la estabilidad del producto. Asimismo, el empleo de condiciones de operación controladas garantiza la reproducibilidad del proceso y facilita la toma de decisiones en la planificación del secado.

En consecuencia, la optimización realizada demuestra que el modelo desarrollado constituye una herramienta válida para mejorar la eficiencia del proceso de secado del café, permitiendo establecer tiempos de operación adecuados y reducir el consumo energético asociado a la etapa de deshidratación.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Producto de la presente investigación se concluye:

- La identificación de las variables operativas permitió establecer que el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada está determinado principalmente por la temperatura y la velocidad del aire de secado, la humedad inicial del producto y el espesor de la capa de café, las cuales influyen directamente en los fenómenos de transferencia de calor y masa y, en consecuencia, en la velocidad de eliminación de la humedad. Se evidenció que la temperatura y la velocidad del aire son los factores más influyentes al incrementar el gradiente térmico y favorecer la evaporación del agua, reduciendo el tiempo de secado, mientras que la humedad inicial y el espesor de la capa condicionan la duración del proceso al aumentar la resistencia interna a la difusión de la humedad. En ese sentido, el control adecuado de estas variables resulta fundamental para mejorar la eficiencia y uniformidad del secado, constituyendo además la base técnica para el desarrollo del modelo matemático y la optimización del tiempo de operación del secador bajo condiciones de convección forzada.
- El desarrollo del modelo matemático permitió describir de manera integral los fenómenos de transferencia de calor y masa que intervienen en el proceso de secado del café en un secador rectangular por convección forzada, integrando

las ecuaciones de difusión de humedad y conducción térmica con las condiciones de convección del aire de secado. Los resultados obtenidos evidencian que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica del proceso, especialmente en la etapa de velocidad decreciente, donde la difusión interna de la humedad y el intercambio térmico controlan la cinética del secado. Asimismo, su ajuste con datos experimentales demuestra una adecuada capacidad predictiva para estimar el contenido de humedad del café en función del tiempo y de las condiciones operativas. En consecuencia, el modelo desarrollado constituye una herramienta técnica válida para el análisis, simulación y optimización del proceso de secado, permitiendo comprender el comportamiento del sistema y apoyar la toma de decisiones en la operación del secador bajo condiciones de convección forzada.

- La validación del modelo propuesto, realizada mediante la comparación entre los resultados estimados y los datos experimentales obtenidos durante el proceso de secado del café, evidenció una alta concordancia entre ambos, reflejada en errores mínimos y un elevado coeficiente de determinación, lo que confirma la capacidad del modelo para reproducir de manera confiable la cinética de secado bajo condiciones de convección forzada. El comportamiento de las curvas experimentales y modeladas mostró una tendencia similar en la reducción progresiva del contenido de humedad, especialmente en la etapa de velocidad decreciente, donde predominan los fenómenos de transferencia interna de calor y masa. En consecuencia, se concluye que el modelo matemático desarrollado es adecuado y válido para representar el proceso de secado del café,

constituyéndose en una herramienta confiable para la predicción del comportamiento del sistema y la optimización de las condiciones de operación del secador.

- La optimización del tiempo de secado del café, realizada a partir del modelo matemático desarrollado y bajo condiciones de operación controladas, permitió determinar de manera precisa el tiempo mínimo requerido para alcanzar el contenido de humedad final establecido, evidenciando una reducción progresiva del agua contenida en el producto conforme avanza el proceso. Los resultados confirmaron que el modelo describe adecuadamente la cinética de secado y facilita la estimación del tiempo óptimo de operación del secador, garantizando la eficiencia del proceso sin comprometer la estabilidad del café. En ese sentido, se concluye que el uso del modelamiento matemático constituye una herramienta eficaz para la planificación y control del secado, permitiendo optimizar el tiempo de operación, mejorar el aprovechamiento del equipo y contribuir a la toma de decisiones técnicas en sistemas de secado por convección forzada.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda:

Implementar el modelo matemático desarrollado como herramienta de apoyo en la operación del secador, a fin de predecir el comportamiento del proceso y establecer tiempos de secado adecuados según las condiciones de trabajo.

Evaluar el modelo propuesto en diferentes condiciones de operación y con distintos tipos de café, con el fin de ampliar su aplicabilidad y mejorar su capacidad predictiva.

Incorporar sistemas de monitoreo y control automático de temperatura, flujo de aire y humedad, que permitan optimizar el proceso y reducir la variabilidad operativa.

Desarrollar estudios complementarios que consideren el impacto del secado sobre la calidad física y sensorial del café, así como el consumo energético del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

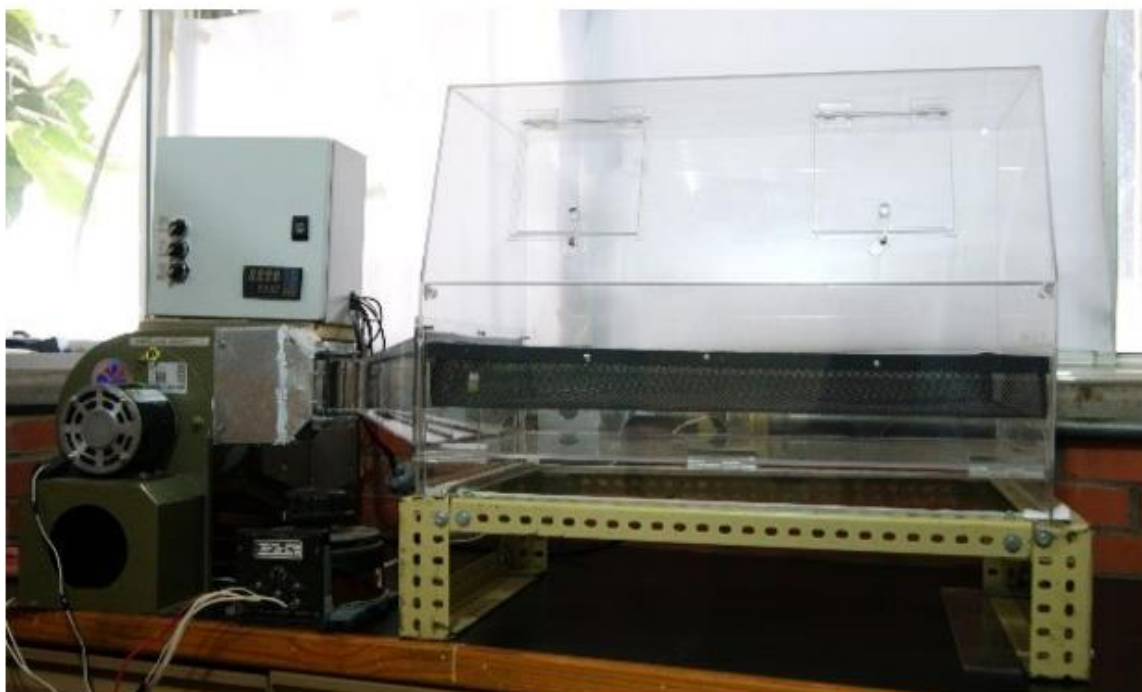
Bibliografía

- Becerra Montalvo, D. (2021). *Propuesta de mejora en el proceso productivo de la planta de beneficio húmedo y secado de café (coffea arabica) en Palla Peña*. Lambayeque: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.
- Bravo, D. A., & Acuña, W. (2022). *Prototipo para el control de temperatura y humedad en el secado mecánico del café*. Colombia: Universidad del Norte. Obtenido de <https://doi.org/10.14482/inde.40.01.621.004>
- Casaverde Pacherez, L. A. (2022). *Modelación y diseño de un sistema de control automático para tratamiento DIC en un proceso de secado*. . Piura: Universidad de Piura.
- Castillo Ruesta, V. H. (2023). *Diseño de un sistema para obtención de agua caliente sanitaria, con energía solar, para camal de beneficio de aves en Piura*. Piura: Universidad de Piura.
- Díaz Delgado, R. S. (2019). *Diseño a través de sistemas pasivos de climatización para lograr confort térmico en la zona cultural permanente de un museo histórico narrativo, Cajamarca – 2019*. Perú: Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/22064/Díaz%20Delgado%20Rita%20Sthefany.PDF?sequence=3>
- Diego Fernando, J. R. (2022). *Modelación de un secador rectangular para el secado de cacao en convección forzada*. . Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Elías Chiyón, F. A., Ocaña Huamán, A. R., & Ortiz Monzón, I. S. (2020). *Modelado del proceso de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de frutas*. . Piura: Universidad de Piura.
- Gallego Agudelo, C. P., Quinchua, I., Carlos, L., & Osorio Pérez, V. (2023). *Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial*. Colombia: CENICAFE. Obtenido de https://www.cenicafe.org/es/publications/Articulo_Influencia.pdf
- Guzmán Hernández, I. A. (2019). *Problemática de los sistemas pasivos de climatización*. España: Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido de <http://dx.doi.org/2636.2236/AULA.2019.007>
- Henao Arismendy, J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56186/1128270450.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Hernández Ruiz, A. C., Rhenals Julio, J. D., & Martínez Guarín, A. R. (2023). *Modelado cinético del secado de contenido ruminal con efectos multidimensionales*. . Argentina: Universidad de Córdoba.
- Huaman Murillo, M. d. (2022). *Calidad Físico, Microbiológica y Sensorial del Café Pergamino en tres prototipos de secadores en la Selva*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9376/Redaccion%20maestria%20Huaman%20Murillo%20para%20repositorio%20julio%2023_removed.pdf;jsessionid=2FC2CD61EF8E107F048680FADBD7C940?sequence=1
- López Fonta, E. M. (2006). *Secado de café en lecho fluidizado*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64326102.pdf>
- Puerta Quintero, G. I. (2008). *Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado*. Colombia: CENICAFE. Obtenido de <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/399/1/avt0371.pdf>
- Saavedra Moran, O. X. (2021). *Modelado Computacional y Validación CFD del Proceso de Secado de la Almendra de cacao por Convección Forzada*. . Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vega Carpio, G. R. (2023). *Optimización del proceso de secado de café orgánico para el aumento de la productividad en una empresa cafetalera, Lima 2019*. Lima, Perú: Universidad San Ignacio de Loyola. Obtenido de <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/bd7e49e2-d8d5-4c6b-9136-d3792c39c994/content>

ANEXOS

ANEXO 01: Vista fotográfica del Secador Solar, empleado en el estudio



ANEXO 02: Características del secador rectangular por convección forzada

1. Dimensiones del equipo

Tipo de secador: Rectangular de bandejas con convección forzada

Longitud: 2.0 m

Ancho: 1.5 m

Altura: 1.8 m

Área útil de secado: 3.0 m²

Número de bandejas: 4

Espesor de capa de café: 5–7 cm

2. Capacidad de operación

Capacidad de carga por lote: 100 – 150 kg de café pergamino

Capacidad por bandeja: 25 – 35 kg

Tiempo promedio de secado: 6 – 8 h por lote

Rango de humedad inicial del producto: 40 – 50 % b.h.

Humedad final requerida: 10 – 12 % b.h.

3. Sistema de convección forzada

Tipo de flujo de aire: Horizontal

Velocidad del aire: 2 – 3 m/s

Caudal de aire: 1.5 – 2.0 m³/s

Tipo de ventilación: Ventilador centrífugo

4. Sistema de calentamiento

Tipo de energía: Eléctrica

Potencia del calentador: 4 – 6 kW

Temperatura de operación del aire: 45 – 60 °C

Sistema de control: Termostato digital

5. Instrumentación del secador

Termómetro digital o termopares

Anemómetro para medición de velocidad del aire

Higrómetro para humedad relativa

Balanza digital para control de masa del café

Medidor de humedad de granos

ANEXO 03: Vista fotográfica de los instrumentos utilizados en las mediciones realizadas

Medición de temperatura del aire en el secador mediante termopar



Determinación de la velocidad del aire en el sistema de secado mediante anemómetro digital.



Determinación del contenido de humedad del café con medidor portátil para granos.

