

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OPTIMIZACIÓN DE EQUIPOS TÉRMICOS Y TERMODINÁMICOS CON ENFOQUE MECATRÓNICO

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DE UN DESHIDRATADOR SOLAR DE CAFÉ A PARTIR DE UN ENFOQUE MULTIDISCIPLINARIO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
MECÁNICA**

EVELYN VANESSA CHIRIBOGA HURTADO

evelyn.chiriboga@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. ÁLVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, EVELYN VANESSA CHIRIBOGA HURTADO 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.



EVELYN VANESSA CHIRIBOGA HURTADO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por EVELYN VANESSA CHIRIBOGA HURTADO, bajo mi supervisión.



DR. ÁLVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN

DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.



**DR. CARLOS ANDRÉS NARANJO
MENDOZA**

**REVISOR 1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



**DR. EDGAR HERNÁN CANDO
NARVAÉZ**

**REVISOR 2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

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.

EVELYN VANESSA CHIRIBOGA HURTADO

DR. ÁLVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN

DEDICATORIA

El presente Trabajo de Integración Curricular va dedicado primeramente a Dios, por permitirme llegar hasta este punto tan importante de mi vida, por bendecirme y darme la oportunidad de despertar cada día con salud y vida. Por ser mi guía incondicional y brindarme el apoyo que necesitaba para culminar con éxito cada etapa de mi trayectoria profesional y cumplir con todos mis objetivos propuestos.

A mi padre Carlos (+), quien cuida y guía mi camino desde el cielo. Siempre tendré presente cada una de sus enseñanzas y aunque nos faltaron muchas experiencias por compartir, estoy segura de que este momento en mi vida es igual de importante para los dos.

A mi madre Marta, por ser un pilar fundamental en mi vida, para mi tú eres y serás siempre mi modelo de esfuerzo y valentía a seguir ante las adversidades. Tus consejos, cariño y apoyo incondicional siempre serán mi motor para seguir adelante y apoyarme en los momentos que más lo necesite.

A mi hermana Jessica, a quien quiero infinitamente por ser la persona que con sus palabras de aliento evitaba que abandonaré mis sueños, cuando sentía que no podía lograrlos. Gracias a ti, cambie mi perspectiva de ver las cosas y hoy se firmemente lo que debo hacer para lograrlo.

Evelyn Vanessa Chiriboga Hurtado

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por sus bendiciones y apoyo en los momentos más difíciles de mi vida. Por concederme la oportunidad de disfrutar cada uno de mis logros en compañía de mis seres queridos, de rectificar mis errores y considerar cada uno de ellos como una oportunidad de aprendizaje para crecer como persona.

A mis padres Marta y Carlos (+); y mi hermana Jessica, por estar siempre conmigo y ser los promotores principales de mis sueños, por confiar firmemente en mis capacidades y porque con cada uno de sus consejos lograron minimizar uno a uno mis temores. Ustedes para mí, son y serán siempre la razón por la cual seguiré esforzándome día a día para ser una mejor persona tanto en el ámbito personal como profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional y a cada uno de los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, quienes con mucha dedicación me impartieron todos los conocimientos necesarios para mi formación profesional, de manera especial al Dr. Álvaro Aguinaga Barragán, director del presente Trabajo de Integración Curricular, quien con mucha paciencia fue un pilar fundamental en la realización y culminación del presente proyecto, al brindarme su apoyo, dirección, orientación, sugerencias y recomendaciones en base a su experiencia en este campo de aplicación.

A todos ustedes mi infinito y sincero agradecimiento.

Evelyn Vanessa Chiriboga Hurtado

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Actualidad del café en Ecuador	4
1.4.2 Contexto general de la provincia de Loja.....	5
1.4.2.1 Ubicación.....	5
1.4.2.2 Zonas geográficas idóneas para el cultivo de café	5
1.4.2.3 Características atmosféricas de las plantaciones de café	5
1.4.3 Deshidratación de café.....	7
1.4.3.1 Técnicas de deshidratación.....	8
1.4.3.2 Innovaciones en el proceso de deshidratación.....	8
1.4.4 Aprovechamiento de la energía solar en el proceso de secado	8
1.4.4.1.1 Deshidratador o secador de bandejas	9
1.4.4.1.2 Bomba de calor.....	10
1.4.4.1.2.1 Bombas de calor asistidas por energía solar (SHP)	10
1.4.5 Transferencia de calor y masa.....	12
1.4.6 Optimización de deshidratadores de alimentos	12
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Enfoque metodológico.....	14
2.2 Criterios de optimización del deshidratador solar de café.....	14
2.3 Descripción del proceso a controlar.....	16
2.4 Modelo matemático de un deshidratador solar de café.....	17
2.4.1 Análisis termodinámico del sistema.....	17
2.4.1.1 Análisis energético: Primera ley de la termodinámica.....	17
2.4.1.1.1 Deshidratador de bandejas	17
2.4.1.1.1.1 Balance de masa	17
2.4.1.1.1.2 Balance de energía.....	18
2.4.1.1.1.3 Eficiencia energética.....	19

2.4.1.1.2	Bomba de calor asistida por un PVT.....	20
2.4.1.1.2.1	Ciclo termodinámico de una bomba de calor.....	20
2.4.1.1.2.2	Balance de energía.....	21
2.4.1.1.2.3	Eficiencia energética.....	21
2.4.1.1.3	Panel solar híbrido (PVT).....	21
2.4.1.1.3.1	Balance de energía.....	22
2.4.1.2	Análisis exergético: Segunda ley de la termodinámica.....	22
2.4.1.2.1	Deshidratador de bandejas.....	23
2.4.1.2.1.1	Exergía del sistema.....	23
2.4.1.2.1.2	Eficiencia exergética.....	23
2.4.1.2.2	Bomba de calor asistida por un PVT.....	23
2.4.1.2.2.1	Flujos exergéticos.....	23
2.4.2	Desarrollo del modelo matemático en espacio de estado.....	24
2.4.2.1	Modelación en Sistemas Abiertos.....	24
2.4.2.2	Modelo linealizado.....	25
2.4.3	Hipótesis del modelo matemático.....	25
2.5	Simulación numérica.....	26
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	28
3.1	Resultados.....	28
3.1.1	Análisis de la Respuesta Temporal en lazo abierto.....	28
3.1.2	Análisis de la Respuesta Temporal en lazo retroalimentado.....	29
3.1.3	Análisis de sensibilidad paramétrica.....	31
3.1.3.1	Cambio de los parámetros geométricos.....	31
3.1.3.1.1	Variación del ancho del deshidratador de café.....	31
3.1.3.2	Cambio de los parámetros de operación.....	32
3.1.3.2.1	Variación del potencial de radiación solar.....	32
3.1.3.2.2	Variación de las pérdidas de calor en el deshidratador.....	34
3.1.3.2.3	Variación de la temperatura de secado.....	35
3.1.4	Coefficientes optimizados.....	39
3.2	Conclusiones.....	41
3.3	Recomendaciones.....	43
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
5	ANEXOS.....	47

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular tiene como finalidad desarrollar una propuesta que permita optimizar el proceso de deshidratación de café, haciéndolo más eficiente y menos contaminante mediante el monitoreo y control de los parámetros asociados al mismo. Para ello, en el Capítulo 1, se iniciará con una recopilación bibliográfica como base teórica para la modelación, en la cual se reunirá información referente a la zona de estudio y al proceso de deshidratación. En el Capítulo 2, para definir el problema planteado y proporcionar una visión estructurada de la realidad del proceso, se desarrolló un modelo matemático en espacio de estado para describir el comportamiento dinámico del sistema, cuya resolución se ejecutará a través del software de simulación Matlab, dando lugar a la generación de diversas soluciones para hacer posible la optimización del equipo. Por su lado, en el Capítulo 3, se realizará un análisis de sensibilidad paramétrica con la finalidad de obtener los parámetros óptimos de operación, cuya representación gráfica se realizará en el software Minitab. Adicionalmente, se indicará la discusión de los resultados obtenidos antes y después de la optimización. Para complementar, se concluyó que el resultado obtenido, permitirá solventar los problemas de optimización comunes, siendo el medio ambiente uno de los principales beneficiarios, en vista de que, se obtuvo una apreciable disminución del consumo energético, lo cual es un resultado favorable, de modo que los pequeños productores de la Provincia de Loja, puedan producir un café de mejor calidad sin hacer uso de la energía convencional.

PALABRAS CLAVE: Optimización, deshidratación, café, modelo matemático, simulación numérica.

ABSTRACT

The purpose of this Curricular Integration Project is to develop a proposal to optimize the coffee dehydration process, making it more efficient and less polluting by monitoring and controlling the parameters associated with it. To do this, in Chapter 1, it will begin with a bibliographic compilation as a theoretical basis for the modeling, in which information regarding the study area and the dehydration process will be gathered. In Chapter 2, in order to define the problem and provide a structured view of the reality of the process, a mathematical model in state space was developed to describe the dynamic behavior of the system, whose resolution will be executed through Matlab simulation software, resulting in the generation of various solutions to make possible the optimization of the equipment. On the other hand, in Chapter 3, a parametric sensitivity analysis will be carried out in order to obtain the optimal operating parameters, whose graphical representation will be performed in Minitab software. Additionally, the discussion of the results obtained before and after optimization will be indicated. To complement, it was concluded that the result obtained allowed solving the common optimization problems, being the environment one of the main beneficiaries, since an appreciable decrease in energy consumption was obtained, which is a favorable result, so that the small producers of the Province of Loja can produce a better quality coffee without using conventional energy.

KEYWORDS: Optimization, dehydration, coffee, mathematical model, numerical simulation.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es evidente que el uso de recursos energéticos como el gas natural y el petróleo son limitados, es por ello que, en los distintos sectores industriales, incluido el cafetero es importante identificar cuál de las diferentes formas de energía es la más eficiente (Cáliz, 2016). Entre las fuentes de energía renovable, la energía solar se destaca, en vista de que, juega un rol muy importante en el aspecto medio ambiental al producir energía eléctrica limpia libre de contaminación (Energcity S.A., 2019). Sustentado en impulsar un cambio en la matriz energética, el Ecuador no ha sido la excepción, ya que en el país se ha ido incorporando gradualmente el uso sistemas solares, tal como es el caso de la provincia de Loja, la cual es privilegiada por ser una de las provincias cafeteras que, mayor potencial solar presenta, alcanzando niveles de radiación de hasta 5.7 kWh/m² día para la generación de electricidad (Vaca-Revelo & Ordoñez, 2019). En este contexto, se ha considerado conveniente el uso de la energía solar en el proceso de deshidratación de café, dado que, en la mayoría de las zonas cafeteras para producciones menores a 300 arrobas de café al año, este proceso se realiza empleando únicamente energía solar como fuente de calor (Castrillo & Pinto, 2019). No obstante, la falta de infraestructura, las condiciones climáticas adversas que regularmente coinciden con las pocas horas de sol y los periodos de lluvia, impiden que esta tarea se realice de forma eficiente, incrementando así el riesgo de que el grano de café se contamine y con ello, pierda su calidad, lo cual afectaría directamente a los ingresos de los caficultores, teniendo en cuenta que, cerca de 46 mil productores a nivel nacional destinan cerca de 96,312 hectáreas para su cultivo (Rikolto, 2021). Es por ello, que en aras de mejorar, gestionar y optimizar de manera eficiente el consumo de energía durante el proceso de deshidratación de café, se propone la integración de una bomba de calor asistida por energía solar (SHP), como un medio para acelerar el proceso e incrementar su capacidad y eficiencia energética, a fin de convertirse en una de las aplicaciones más prometedoras en la producción de café, dado el aporte que generaría especialmente en el sector rural. En virtud de ello, en el presente proyecto se desarrollará la propuesta de un modelo de optimización energética y exergética de un deshidratador solar de café asistido por una bomba de calor (SHP), a partir de un enfoque multidisciplinario (sistémico, holístico, mecatrónico y ambiental) en cumplimiento con los objetivos propuestos, las necesidades de los caficultores y las restricciones de la zona de estudio, que en este caso son los pequeños productores de la provincia de Loja. Finalmente, teniendo en cuenta todos los planteamientos presentados, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible reducir el consumo energético de un deshidratador solar de café asistido por una bomba de calor mediante la modelación matemática y simulación numérica del comportamiento del sistema, sin afectar las propiedades del producto final?

1.1 Objetivo general

Optimizar un deshidratador solar de café destinado a los pequeños productores de la provincia de Loja, mediante un enfoque multidisciplinario para la modelación matemática y simulación numérica del comportamiento dinámico del sistema en espacio de estado con la finalidad de mejorar su eficiencia energética durante la deshumidificación del aire en el proceso secado.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica que aporte con los conocimientos teóricos necesarios para llevar a cabo la investigación.
2. Desarrollar el modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema en espacio de estado de un deshidratador solar de café.
3. Simular computacionalmente el comportamiento dinámico del sistema mediante el control y regulación de las variables con el propósito de encontrar el modelo que mejor se adapte a las condiciones de operación del equipo.
4. Identificar las condiciones críticas de operación del equipo mediante la realización de un análisis de sensibilidad paramétrica del modelo desarrollado.
5. Estimar el consumo energético en el proceso de deshidratación de café mediante la evaluación de los resultados obtenidos.

1.3 Alcance

En cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos propuestos en el presente Trabajo de Integración Curricular, se realizarán las siguientes actividades.

Objetivo específico 1 (OE1): Realizar una revisión bibliográfica que aporte con los conocimientos teóricos necesarios para llevar a cabo la investigación.

- *Actividad (A1.1):* Recopilación de 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):* Elaboración de un informe con la información recopilada acerca de los principios y parámetros básicos de los deshidratadores solares de café y demás factores que influyen en el proceso de secado.

Objetivo específico 2 (OE2): Desarrollar el modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema en espacio de estado de un deshidratador solar de café.

- *Actividad (A2.1):* Definición de los conceptos básicos y terminología asociados con el modelado del sistema.
- *Actividad (A2.2):* Descripción del sistema e identificación de los mecanismos de transferencia de calor y masa relacionados en el proceso de secado.
- *Actividad (A2.3):* Representación de las ecuaciones diferenciales en espacio de estado y en modelos matemáticos de entrada-salida.
- *Actividad (A2.4):* Planteamiento de las hipótesis (suposiciones) que gobiernan el modelo matemático.
- *Producto (P2.1):* Elaboración de un reporte con el desarrollo del modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema.

Objetivo específico 3 (OE3): Simular computacionalmente el comportamiento dinámico del sistema mediante el control y regulación de las variables con el propósito de encontrar el modelo que mejor se adapte a las condiciones de operación del equipo.

- *Actividad (A3.1):* Estimación de los parámetros y condiciones iniciales necesarias para la resolución del modelo matemático (variables de entrada).
- *Actividad (A3.2):* Representación del modelo en espacio de estado y en parámetros de entrada y salida.
- *Actividad (A3.3):* Resolución del modelo matemático mediante el uso de un software de simulación.
- *Actividad (A3.4):* Análisis de las respuestas de simulación.
- *Producto (P3.1):* Elaboración de una memoria con los resultados numéricos y gráficos de la simulación.

Objetivo específico 4 (OE4): Identificar las condiciones críticas de operación del equipo mediante la realización de un análisis de sensibilidad paramétrica del modelo desarrollado.

- *Actividad (A4.1):* Realizar simulaciones secuenciales del modelo matemático del sistema cambiando el valor de cada parámetro en el tiempo.
- *Actividad (A4.2):* Obtención de los coeficientes optimizados.
- *Actividad (A4.3):* Simulación del sistema con los coeficientes optimizados.
- *Actividad (A4.4):* Determinación de las condiciones críticas de operación del equipo.
- *Producto (P4.1):* Elaboración de una memoria con los resultados del análisis de sensibilidad paramétrica y las gráficas obtenidas de cada variable de interés en función del tiempo.

Objetivo específico 5 (OE5): Estimar el consumo energético en el proceso de deshidratación de café mediante la evaluación de los resultados obtenidos.

- *Actividad (A5.1):* Estimación del ahorro energético generado en referencia a los

resultados obtenidos en la modelación y simulación del sistema para los parámetros óptimos.

- *Producto (P5.1)*: Elaboración de un informe final donde se dé a conocer los resultados obtenidos en cumplimiento con los objetivos propuestos.



1.4 Marco teórico

Actualmente existe gran interés por el uso eficiente de la energía y la optimización de los recursos usados en el aprovechamiento de la misma. En este sentido, en el marco de la preservación medioambiental, el uso de la energía solar en la deshidratación de alimentos ha ganado mayor relevancia, dado que su uso permite una reducción considerable del consumo de energía eléctrica o GLP (Marroquín-Cano et al., 2017). Con la finalidad de dar un panorama general de los temas relacionados al contenido del Trabajo de Integración Curricular, en este apartado se realiza una breve conceptualización de las generalidades del café, el proceso de deshidratación y distintos sistemas de aprovechamiento de energía solar para el desarrollo y puesta en marcha del proyecto, a fin de aclarar y contextualizar el problema de investigación.

1.4.1 Actualidad del café en Ecuador

“El café es parte de la identidad del Ecuador” (Rikolto, 2021). La implementación de nuevas técnicas, conocimientos y tecnologías complementarias al proceso de producción de café, ha incrementado notablemente su apreciación extranjera, haciéndolo actualmente uno de los más cotizados y competitivos en el mercado mundial (CEFA Ecuador, 2019). Adicionalmente, debido a la gran capacidad cafetera que posee el Ecuador, es el único país que exporta dos tipos de café: arábigo y robusta (Robles, 2015). En la Tabla 1.1, se indican las principales características de cada uno.

Tabla 1.1. Comparación de las características de los diferentes tipos de café.

Tipo de café	Arábigo	Robusta
Producción mundial	70%	30%
Disponibilidad	Marzo a octubre	Junio a octubre
Lugar	Región Sierra y Manabí	Región Costa y Amazonia
Apariencia		

Nota. Datos tomados de (CEFA Ecuador, 2019) y (Toledo, 2015).

1.4.2 Contexto general de la provincia de Loja

Este segmento del proyecto se enfoca directamente en aspectos propios de la provincia de Loja.

1.4.2.1 Ubicación

La provincia de Loja está ubicada al sur del Ecuador a aproximadamente 675 kilómetros de la ciudad de Quito (Toledo-Macas et al., 2019). Cuenta con una extensión de 11.100 km² a una altura que oscila entre los 700 y 3876 m s. n. m. (Toledo, 2015).

1.4.2.2 Zonas geográficas idóneas para el cultivo de café

En la provincia de Loja el cultivo predominante es el café arábigo, gracias a la potencialidad biofísica que posee. A continuación, en la Figura 1.1 se indican los cantones productores de café de altura.



Figura 1.1. Zonas productoras de café en la provincia de Loja.

Nota. Elaboración propia.

1.4.2.3 Características atmosféricas de las plantaciones de café

En el sector cafetero, es importante considerar un conjunto de condiciones que deben presentarse para la adecuada obtención de café, entre ellas se tienen:

Altura

Esta condición hace referencia a la zona geográfica donde se cultiva el café y varía según la especie que se esté cultivando (Toledo, 2015). El café arábigo se cultiva generalmente a alturas que oscilan entre los 1000 y 1800 m s. n. m. (CEFA Ecuador, 2019).

Temperatura ambiente

Este parámetro depende en cierta forma de la altura, debido a que los vientos fríos y las brisas en los pisos climáticos actúan como una función reguladora (Toledo, 2015). En la provincia de Loja, las temperaturas óptimas fluctúan entre los 16 y 21°C, lo cual es adecuado, dado que, a temperaturas mayores a 24°C, la planta de café no crece favorablemente (EcuRed, 2019).

Humedad relativa

Es una condición que depende de la temperatura, la altura y la precipitación. La humedad relativa conveniente para el cultivo de café arábigo varía entre el 70 y 95%. Por lo general, se evita utilizar valores altos, para impedir la proliferación de plagas (Toledo, 2015).

Precipitación

Esta condición hace referencia a los niveles de lluvia necesarios para una adecuada producción de café. Su valor varía debido a la influencia de factores como la temperatura y la estructura del suelo, llegando a valores mínimos de 760 a 1780 mm y máximos de 990 a 3000 mm (Toledo, 2015).

Radiación solar

El Ecuador al estar localizado sobre la línea ecuatorial, posee algunas ventajas para el aprovechamiento de la energía solar, dado que, posee características topográficas muy variadas y de gran diversidad climática (Roa & Ortega, 2011). Por lo tanto, en referencia a la Figura 1.2, se puede evidenciar que los niveles de radiación solar en el país son lo suficientemente elevados para la implementación de tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas (Vaca-Revelo & Ordoñez, 2019).

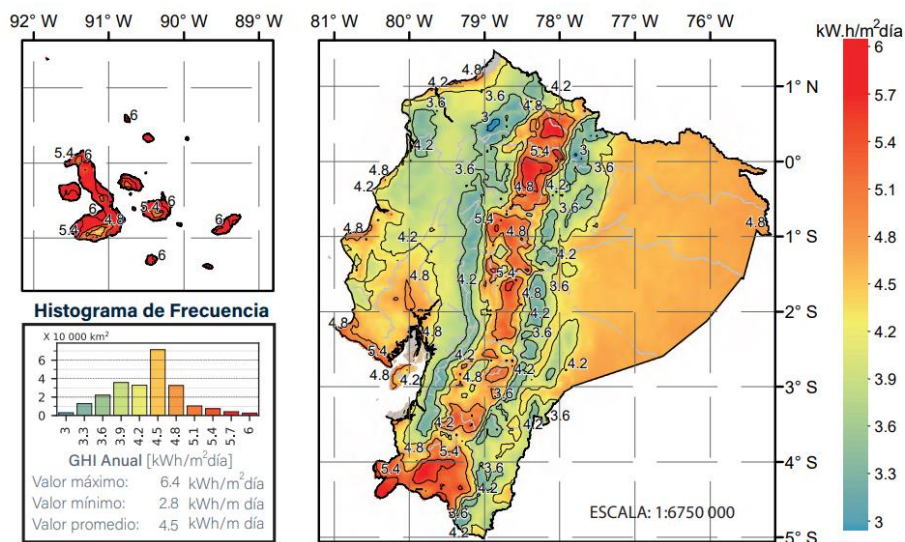


Figura 1.2. Irradiación solar global horizontal (GHI) anual.

Fuente. (Vaca-Revelo & Ordoñez, 2019).

La provincia de Loja es una de las provincias que mayor potencial solar presenta con niveles que van desde los 4.2 a los 5.7 kWh/m² día, el cual es un rango idóneo para la implementación de un deshidratador solar de café (Vaca-Revelo & Ordoñez, 2019). En la Tabla 1.2, se indican los parámetros ambientales de la provincia de Loja en el año 2021.

Tabla 1.2. Parámetros ambientales de la provincia de Loja durante el 2021.


Meses	Temperatura			Precipitación (mm)	Humedad (%)	Días lluviosos (días)	Horas de sol (horas)	Energía solar (kWh)
	Mínima (°C)	Media (°C)	Máxima (°C)					
Enero	12,8	15,1	18,9	179,0	80,0	19,0	6,6	5,0
Febrero	12,9	15,1	18,7	208,0	83,0	18,0	6,3	4,9
Marzo	12,8	15,2	18,8	215,0	82,0	19,0	6,9	5,0
Abril	12,7	15,2	18,7	164,0	81,0	18,0	7,0	5,1
Mayo	12,4	15,1	18,7	96,0	79,0	14,0	7,1	5,2
Junio	11,5	14,3	17,9	62,0	78,0	12,0	6,8	5,3
Julio	10,7	13,9	17,8	49,0	76,0	11,0	6,8	5,6
Agosto	10,7	14,4	18,7	35,0	73,0	8,0	7,8	6,0
Septiembre	11,7	15,4	19,8	46,0	70,0	9,0	8,3	6,0
Octubre	12,4	15,6	20,0	101,0	74,0	14,0	7,9	5,6
Noviembre	12,5	15,5	20,0	143,0	75,0	16,0	7,5	5,4
Diciembre	12,7	15,3	19,2	155,0	79,0	17,0	6,9	5,1
Promedio	12,2	15,0	18,9	121,1	77,5	14,6	7,2	5,4

Nota. Datos tomados de (Climate-Data.org, 2021) y (Weather Spark, 2021).

1.4.3 Deshidratación de café

El proceso de deshidratación o secado es uno de los principales procesos dentro de la producción de café, a razón de que, si este se encuentra excesivamente húmedo, los microorganismos lo atacarán, deteriorando considerablemente su aspecto y calidad. En la Tabla 1.3, se indican los principales defectos a causa de un proceso de deshidratación inadecuado.

Tabla 1.3. Defectos principales en el café.

Físicos	Defectos en taza	Biológicos	Químicos
Granos veteados, flojos, aplastados y sobre secos.	Fermento, tierra, moho y fenol.	Crecimiento de hongos.	Contaminación con gases de combustión.
			

Nota. Datos tomados de (TechnoServe, 2021).

Para evitar la aparición de estos defectos, se recomienda disminuir el porcentaje de humedad del 55% al 12,5%, utilizando una temperatura de secado máxima de 50°C (Besora, 2017).

1.4.3.1 Técnicas de deshidratación

Existen básicamente dos alternativas para la deshidratación de café, ya sea de forma natural o mecánica.

- Deshidratación en forma natural: Es el proceso tradicional, en el cual el café es esparcido en patios o camas de secado y expuesto a radiación solar durante un tiempo aproximado de 8 a 15 días, hasta alcanzar el nivel óptimo de humedad de 12,5% según la Organización Mundial del Café (Besora, 2017).
- Deshidratación artificial o mecánico: En este proceso se utilizan corrientes de aire generadas con un ventilador (convección forzada) en un tiempo aproximado de 25 a 30 horas, con la finalidad de calentar dicho aire y secar el producto rápidamente.

1.4.3.2 Innovaciones en el proceso de deshidratación

En consideración, a que las condiciones climáticas en la Provincia de Loja durante el año son variables (Tabla 1.2), es necesario que la energía recibida por el sistema sea respaldada por una fuente convencional cuando estas condiciones no sean favorables para el proceso. Es por ello, que, en beneficio de los pequeños productores de café, es necesario considerar diferentes formas de energía complementarias para mejorar la eficiencia energética del deshidratador de café, tal como se indica en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Tipos de deshidratado combinado.

Proceso	Deshidratación		
	Aire caliente	Vacío	Bomba de calor
Extracción de humedad (kg agua/kWh)	0,14 – 1,32	0,72 – 1,4	1,0 – 5,0
Eficiencia de secado (%)	45 – 50	< 75	85
Temperatura de operación (°C)	50 – 80	40 – 70	15 – 68
Costo capital	Asequible	Alto	Moderado
Costo de operación	Elevado	Muy alto	Accesible

Nota. Datos tomados de (Zavala, 2013).

En referencia a lo expuesto anteriormente, se puede evidenciar que los deshidratadores con bomba de calor son la mejor alternativa para el secado de café, ya que poseen un buen rendimiento durante el proceso, además de ser muy eficientes energéticamente, dado que, consumen menor cantidad de energía al operar en un rango de temperatura más amplio.

1.4.4 Aprovechamiento de la energía solar en el proceso de secado

En vista de que, para el caso de estudio tanto las cantidades de producción de café como la energía requerida en el proceso de deshidratación son relativamente pequeñas, puede recurrirse al empleo de fuentes de energía alternativas (Díaz, 2016). En este sentido, se abordó el tema de deshidratación de café mediante el uso de energía solar, dado que, esta

opción permite prolongar la vida útil del café mediante la eliminación de la mayor cantidad de agua, a partir de un flujo de aire calentado por radiación solar. Esta opción constituye una alternativa de ahorro energético considerable al reducir la emisión de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles durante el proceso (ISF, 2017).

1.4.4.1 Deshidratador solar asistido con una bomba de calor

Actualmente, el desarrollo en la tecnología de secado ha estimulado la necesidad de ahorrar energía y minimizar el impacto ambiental. Para ello, una de las alternativas energéticamente amigables es el uso de un deshidratador solar con bomba de calor. Esta opción es una combinación entre un deshidratador natural y uno mecánico, debido a que la energía utilizada para la deshidratación del café es solar y el método utilizado para calentar la corriente de aire, a fin de acelerar el secado de café es mecánico (ISF, 2017). A continuación, se presentan las características y aspectos más importantes de cada uno de los elementos que conformarán el sistema “deshidratador solar de café”:

- a) Deshidratador o secador de bandejas
- b) Bomba de calor asistida con energía solar

1.4.4.1.1 Deshidratador o secador de bandejas

La clasificación de los diferentes tipos de deshidratadores solares se basa en el mecanismo de transferencia de calor por convección (Bejarano, 2018). Por tal razón, el deshidratador utilizado en la optimización es el de bandejas, el cual está compuesto por una cámara de secado que puede albergar uno o varios ventiladores que hacen circular el aire caliente a través de las bandejas apiladas, sobre las cuales se colocará la cantidad de café a deshidratar (Santana & Cubillos, 2016), tal y como se observa en la Figura 1.3.

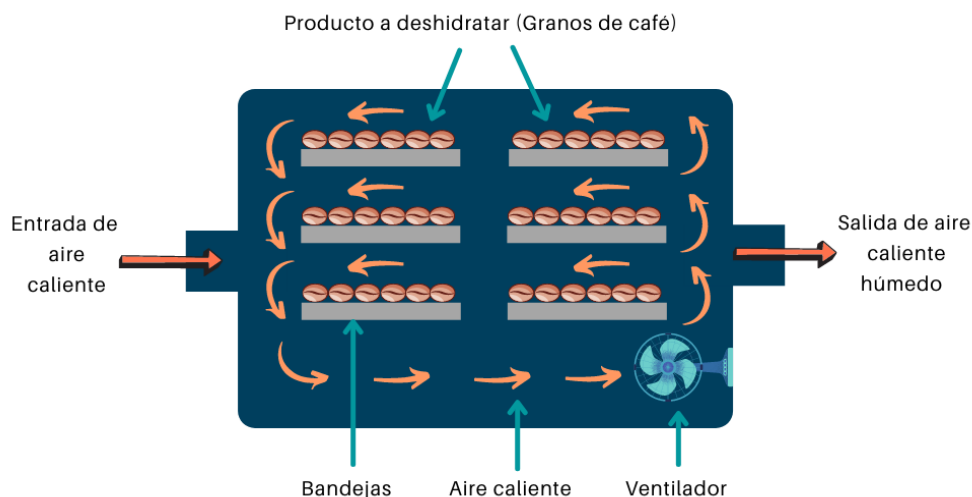


Figura 1.3. Funcionamiento de un deshidratador de bandejas.

Nota. Elaboración propia.

1.4.4.1.2 Bomba de calor

Ante la necesidad de encontrar nuevos sistemas para producir calor que no usen combustibles fósiles, las bombas de calor han ido ganando mayor relevancia, debido a que estos equipos no generan calor sino únicamente lo transportan de un medio a otro, convirtiéndose así en una herramienta indispensable en la optimización de procesos (Muñoz, 2020). Para ello, es fundamental un aporte de trabajo, pues en concordancia con la segunda ley de la termodinámica, el calor se dirige de manera espontánea de una fuente caliente a otra fría, hasta que sus temperaturas se igualen, y no al revés (Luciani & Alzate, 2015).

En la Figura 1.4, se indica el ciclo de una bomba de calor, el cual está compuesto por dos intercambiadores de calor (evaporador y condensador), un compresor y una válvula de expansión. Todos los componentes junto con el fluido de trabajo, permiten el bombeo de calor de una temperatura baja (fuente renovable) a una temperatura más alta para calentar el aire al ingreso del deshidratador solar de café (Almeida & Peñaherrera, 2018).

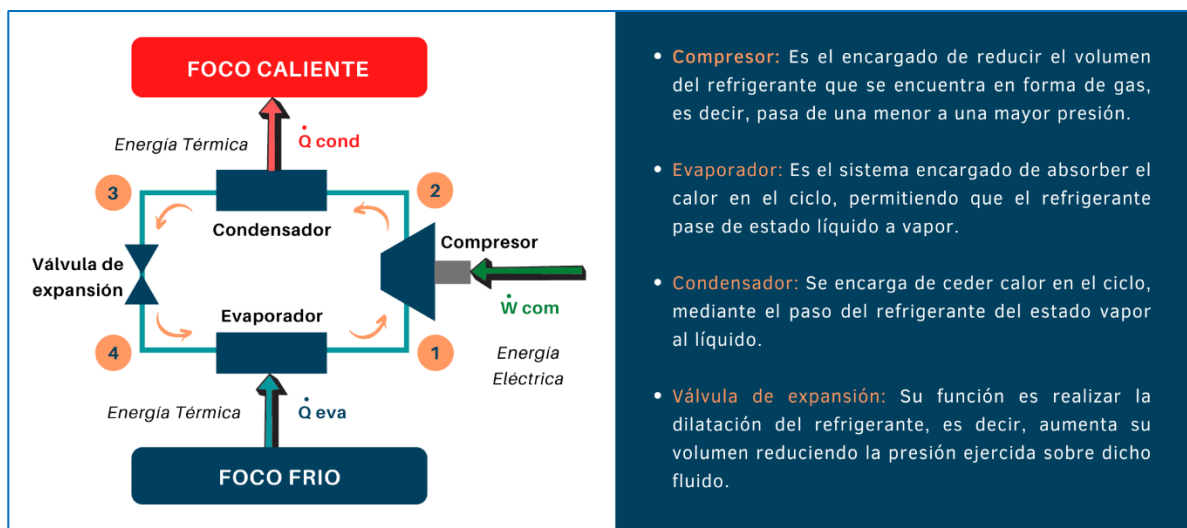


Figura 1.4. Elementos de una bomba de calor.

Nota. Elaboración propia.

1.4.4.1.2.1 Bombas de calor asistidas por energía solar (SHP)

Una bomba de calor (SHP) permite circular la temperatura del medio ambiente y el calor residual de nuevo en un proceso de producción de calor. El encendido de este equipo se realizará por energía solar, la cual es una alternativa de abastecimiento no contaminante y económica. Mediante esta adaptación se busca una reducción considerable tanto de los costos de operación como de las emisiones de CO₂. En la actualidad, las bombas SHP pueden configurarse de tres formas distintas, tal como se indica en la Figura 1.5, para la optimización del deshidratador de café.

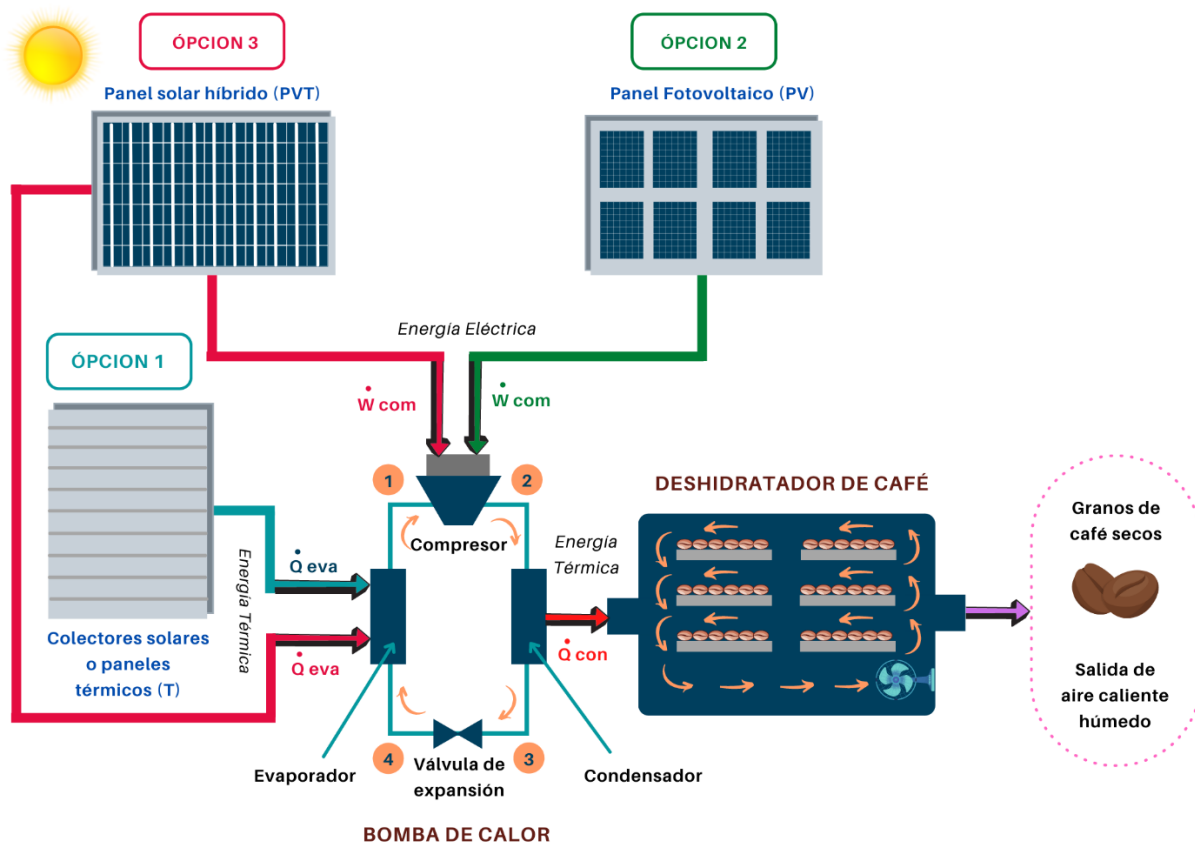


Figura 1.5. Diferentes alternativas de bombas de calor asistidas con energía solar.

Nota. Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 1.5, se indican las principales características de cada una de estas opciones.

Tabla 1.5. Tipos de deshidratado combinado.

Alternativas	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
	Colectores solares o paneles térmicos	Panel fotovoltaico	Paneles solares híbridos
Nomenclatura	T	PV	PVT
Función	Transformar la radiación solar en calor.	Convierte la energía solar en electricidad sin usar combustibles.	Generan a la vez electricidad y calor.
Componentes	Tubos o dos placas conformadas de metal o plástico.	Células fotovoltaicas elaboradas de silicio.	Un módulo fotovoltaico que a su vez incorpora un absorbedor de calor.
Espacio de instalación	Los equipos son menos voluminosos y requieren menos espacio.	Ocupa cerca de 4 veces más espacio que los colectores solares.	Menor espacio, dado que, emplea un único panel solar para producir energía.
Costo de adquisición	Variable	Alto	Bajo
Ahorro de energía	65%	50 - 60%	>60%
Eficiencia energética	80-90%	<20%	60%

Vida útil	10 años	20 años	30 años
Mantenimiento	Simple	Complejo	Simple
Impacto ambiental	100% respetuosas con el medio ambiente.	No se emiten materiales contaminantes	Menor impacto

Nota. Datos tomados de (Carbonell, 2021), (Inarquia, 2021), (GasFrioCalor, 2019), (SolarPlak, 2021).

En base a lo indicado en la Tabla 1.5 y Figura 1.5, se puede evidenciar que la bomba de calor asistida por paneles solares híbridos (PVT), es la mejor opción para mejorar el proceso de deshidratación de café, dado que, al utilizarlos como colectores y acoplarlos a un deshidratador de bandejas permitirá disminuir las pérdidas de calor durante el proceso, dado que, este sistema proporciona tanto energía eléctrica como térmica utilizando únicamente un solo panel, lo cual es ideal cuando el área disponible para la implementación es limitada. Con ello, el sistema adquirirá un buen rendimiento, mayor vida útil y principalmente será amigable con el medio ambiente (Inarquia, 2021).

1.4.5 Transferencia de calor y masa

Independientemente de la alternativa de bomba de calor utilizada para la optimización del sistema, el proceso de deshidratación solar de café incluye simultáneamente la transferencia de calor y masa. La transferencia de masa se da mediante la extracción de la humedad hacia los alrededores y la transferencia de calor hacia el producto mediante los mecanismos de conducción, convección, radiación o por una combinación de estos tres (Masías, 2019).

1.4.6 Optimización de deshidratadores de alimentos

En referencia a la revisión bibliográfica realizada, se indican algunas contribuciones desarrolladas en trabajos de investigación afines, los mismos que han sido de gran relevancia en la elaboración del presente proyecto. A continuación, se detallan cada uno:

- En el proyecto realizado por (Parra et al., 2012) titulado, *“Modelación y Simulación en ambiente Ecosimpro de una Cámara de Secado para Cacao”*, en el cual, se emplearon las ecuaciones de conservación de masa y energía, junto a algunas relaciones obtenidas a través de pruebas experimentales para describir el modelo físico de una cámara de secado de cacao.
- Un estudio similar es el desarrollado por (Vásquez, 2017), con la tesis titulada, *“Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao”*, donde se realizó la modelación matemática

de un secador solar indirecto, por medio de las ecuaciones de transferencia de calor y masa para posteriormente determinar la influencia de las variables de entrada en función del tiempo mediante la realización de un estudio paramétrico.

- De igual manera se ha incursionado en otros métodos de optimización como es el caso del proyecto realizado por (Rodríguez et al., 2017) denominado, “*Diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar*”, en el cual, se desarrolló un sistema de control de temperatura para los productores de escasos recursos, mediante el modelo matemático del comportamiento del sistema y se propuso el control de temperatura a nivel de simulación a través de la aplicación de técnicas de control clásico.

2 METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto se basa en una serie de etapas que abarcarán de principio a fin las actividades que se llevaron a cabo comenzando por atender las necesidades de los pequeños productores de la provincia de Loja, tal como se indica en la Figura 2.1.

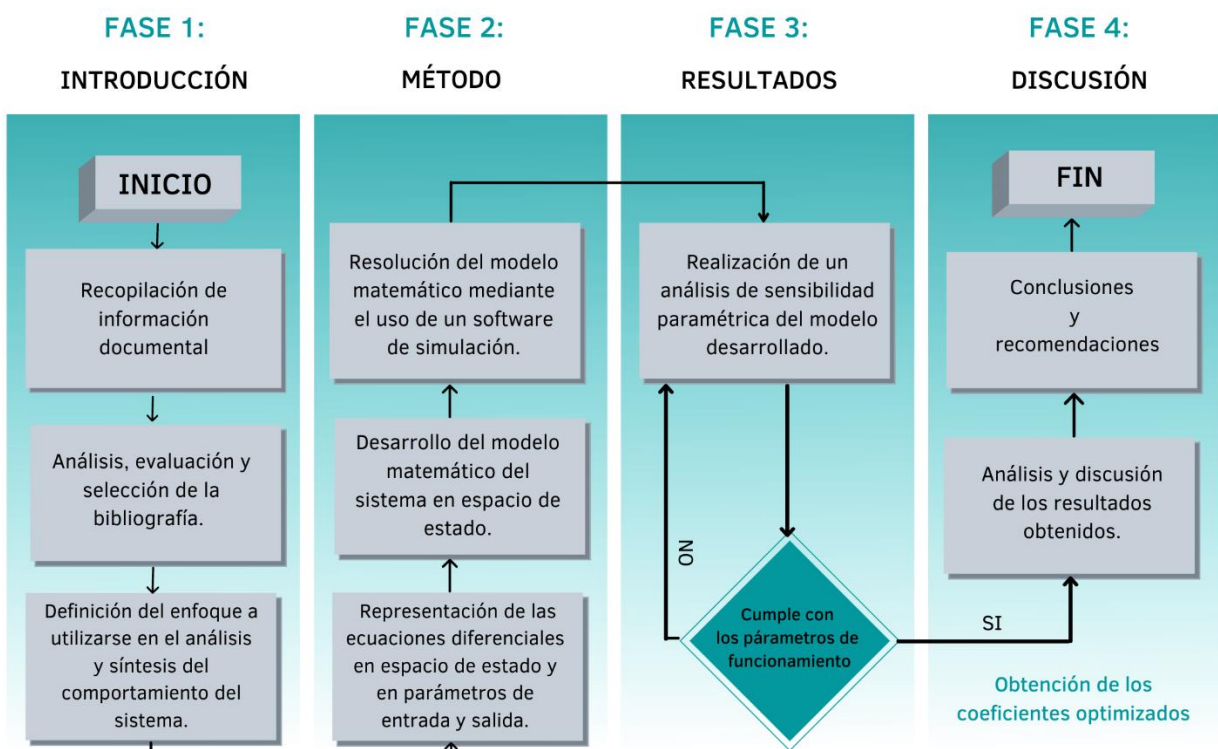


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología.

Nota. Elaboración propia.

2.1 Enfoque metodológico

El presente proyecto surge de la necesidad de emplear nuevas alternativas de secado para solventar los problemas de control que comúnmente aparecen durante el proceso de deshidratación de café. Para ello, se empleará la técnica de deshidratación asistida con una bomba de calor mediante el uso de un panel solar híbrido (PVT), la cual es una solución energéticamente conveniente en beneficio de los pequeños productores de café de la Provincia de Loja. Para el desarrollo del proyecto se optó por realizar una investigación exploratoria y correlacional. En la cual, la investigación exploratoria (cualitativa) consistió en la recopilación de información previamente publicada, a fin de, establecer los conocimientos adecuados sobre el proceso de deshidratación. Mientras que, la investigación correlacional se realizó con el objetivo de detectar que variables del proceso de deshidratación se encuentran conectadas entre sí, de tal manera que se puedan modificar las características del sistema de manera favorable. Adicionalmente, se abordó el tema de la optimización mediante la aplicación de un enfoque multidisciplinario, debido a que este enfoque permite analizar y comprender el problema mediante la cooperación de varias disciplinas en un mismo ámbito, en donde cada una conserva sus métodos y suposiciones (Martínez, 2019). A continuación, en la Tabla 2.1, se detallan cada uno de los enfoques bajo los cuales se desarrolló la optimización del equipo.

Tabla 2.1. Enfoques utilizados en el desarrollo del proyecto.

Enfoque	Descripción	Aplicación en el proyecto
Sistémico	Resalta en el estudio de un sistema integrado por distintas partes, entre las cuales se establece una relación.	Análisis de cada componente en el funcionamiento del sistema.
Holístico	Enfatiza en la importancia del todo, considerando que el sistema completo se comporta de un modo diferente a cada una de sus partes.	Análisis y síntesis del comportamiento termodinámico del sistema.
Mecatrónico	Se combinan diferentes disciplinas. Esta alianza permite enfocar su atención en el control preciso del movimiento.	Desarrollo y resolución del modelo matemático mediante un software de simulación.
Ambiental	Aborda temas de preservación del medio ambiente y manejo eficiente de la energía, a fin de generar prácticas sustentables que mejoren la calidad de vida de las personas.	Selección de la mejor alternativa de ahorro energético para proveer de energía al deshidratador.

Nota. Datos tomados de (Aguinaga, 2009) y (UIN, 2020).

2.2 Criterios de optimización del deshidratador solar de café

En el proceso de deshidratación de café es importante conocer que variables inciden directamente en el proceso y como estas se relacionan para obtener un producto de

calidad. Por lo cual es necesario controlar el mayor número de variables a fin de obtener un proceso más estable. Seguidamente, en la Tabla 2.2, se indican los criterios utilizados en la optimización del deshidratador identificados a partir de la recopilación bibliográfica, donde a cada uno se les asignó una prioridad para facilitar la toma de decisiones sobre las variables que requieren ser optimizadas.

Tabla 2.2. Criterios de optimización considerados.

Parámetros por controlar	Factores de relevancia	Prioridad
Implementación del sistema de energía solar	El colector solar debe ser el adecuado para su integración en un sistema combinado en cumplimiento con la demanda de potencial solar promedio en la Provincia de Loja de 5,4 kWh/m ² día.	Alta
Temperatura de secado	Se requiere alcanzar un valor óptimo de temperatura de secado en un rango de 40 a 60°C, la cual debe ser menor que la temperatura máxima permisible del grano de café (50°C).	Alta
Fluido de trabajo	El fluido de trabajo debe contener las características adecuadas para su utilización en el sistema de captación solar.	Media
Humedad presente en el café	Se requiere llevar un control de humedad, a fin de reducirlo del 55% al 12.5% aproximadamente.	Media
Tiempo de calentamiento inicial	Es necesario disminuir el tiempo de calentamiento inicial del deshidratador en función de las condiciones climatológicas de la provincia.	Alta
Control de temperatura	Se requiere llevar un control de la temperatura del proceso de deshidratación para que opere dentro de un rango deseado.	Alta
Flujo de aire dentro del deshidratador	Es necesario controlar la velocidad con la que el aire pasa por el deshidratador, dado que, tiene influencia directa en la calidad final del café.	Media
Curva de humedad y masa	Es necesario conocer el comportamiento de la humedad en función de la masa que se pierde durante el proceso.	Baja
Curva de temperatura y tiempo	Es indispensable conocer el comportamiento de la temperatura en función del tiempo.	Alta
Eficiencia energética y exérgica del proceso de secado	Es vital conocer que tan eficiente es el proceso de deshidratación, a la hora de comprobar el correcto funcionamiento del equipo.	Alta
Costo de operación	Es necesario conocer los gastos generados en el funcionamiento del deshidratador.	Baja

Nota. Fuente de referencia (Parra et al., 2012).

Para este caso específico, la influencia de cada parámetro en el proceso de deshidratación de café no puede estudiarse de forma aislada, dado que, la variación de una de las variables influye notablemente en el comportamiento de los demás. Esta interrelación entre los parámetros hace que la optimización del deshidratador solar de café se realice con cuidado.

2.3 Descripción del proceso a controlar

El proceso de secado utilizado para la deshidratación de café emplea energía solar proveniente de un panel solar híbrido (PVT) como principal recurso energético. Para ello, el panel híbrido actuará como el evaporador de una bomba de calor, manteniendo el sistema a una baja temperatura como consecuencia de la evaporación del refrigerante (R134a), lo cual le otorga al equipo una alta eficiencia eléctrica y térmica, con la finalidad de acelerar el proceso de deshidratación mediante el incremento de la temperatura del aire al ingreso del deshidratador (Merino, 2020). Luego, en el interior del deshidratador, el aire caliente se direccionará hacia los granos de café de forma perpendicular, evaporando y recibiendo la humedad a medida que circula por cada una de las bandejas, para finalmente ser expulsado al exterior por medio de los ventiladores (Bejarano, 2018). Para la optimización, mediante la modelación matemática y simulación numérica se busca determinar las condiciones de operación ideales, mediante la variación de la temperatura del deshidratador en función del tiempo de calentamiento inicial y de control (PID). En la Figura 2.2, se indica un esquema general del sistema con sus principales componentes.

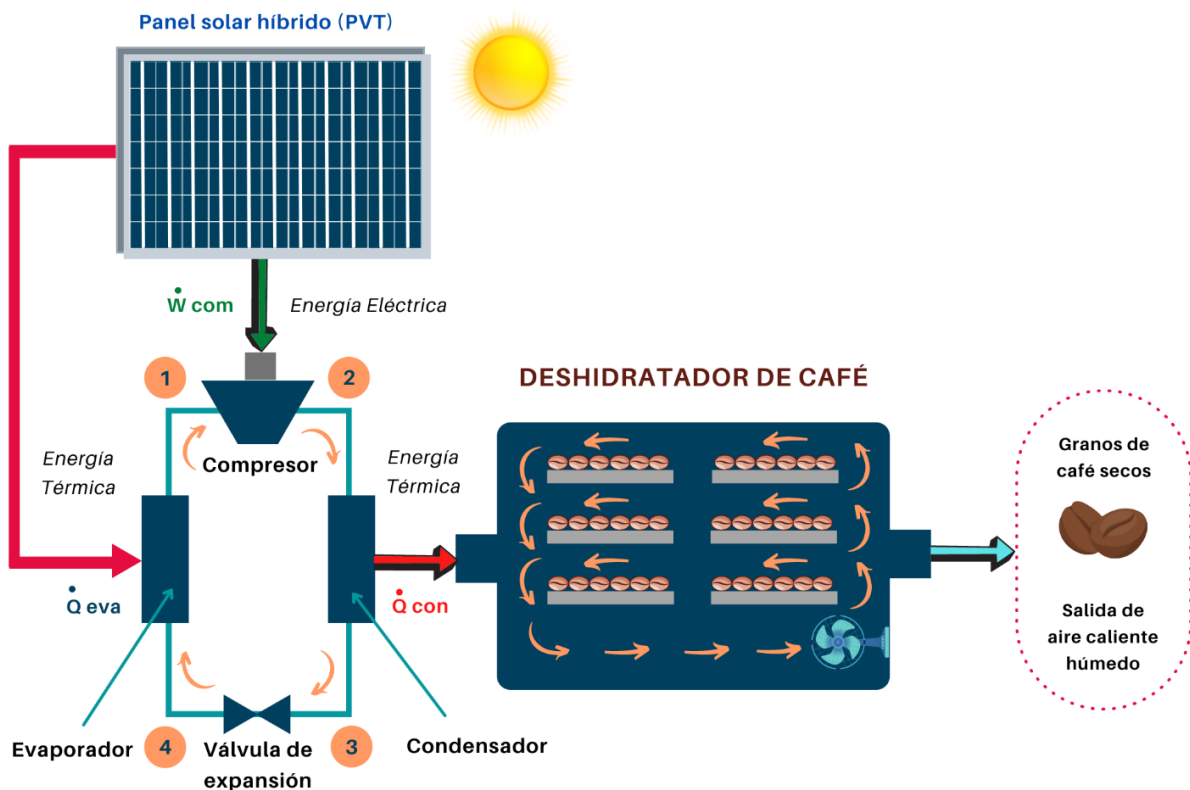


Figura 2.2. Diagrama del deshidratador solar de café.

Nota. Elaboración propia.

Esta opción se presenta como una alternativa ideal para obtener café de buena calidad y sobre todo libre de contaminantes.

2.4 Modelo matemático de un deshidratador solar de café

Uno de los aspectos más importantes en las tecnologías de secado es el modelamiento matemático del proceso, el cual permite predecir los parámetros óptimos del sistema en función del tiempo en referencia a las condiciones iniciales y requerimientos del café a partir de las ecuaciones de balance de energía y masa (Bejarano, 2018). Con la finalidad de complementar el modelo matemático desarrollado se consideran las siguientes relaciones termodinámicas de cada uno de los componentes del deshidratador solar.

2.4.1 Análisis termodinámico del sistema

El análisis termodinámico del proceso de deshidratación de café se basa en la determinación de las variables de estado, fundamentadas en el primer y segundo principio de la termodinámica, es decir, en los análisis energéticos y exergéticos respectivamente (Soto, 2018). La primera ley de la termodinámica basa su teoría en la conservación de la energía, en otras palabras, la energía nunca desaparece. Complementariamente, la segunda ley de la termodinámica sustenta que no es posible aprovechar el 100% de la energía calórica siempre que esta se encuentre en interacción con la atmósfera (Llerena, 2018). A continuación, se desarrollará los balances de energía y masa para cada uno de los elementos del deshidratador.

2.4.1.1 Análisis energético: Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía indica que la variación en la energía interna es igual a la energía transferida hacia los alrededores en forma de calor y de trabajo (Pérez, 2015).

2.4.1.1.1 Deshidratador de bandejas

Para el análisis energético, se considera al deshidratador de bandejas como un sistema abierto, por lo que se modela como un volumen de control, dado que comprende la entrada y salida de masa del sistema.

2.4.1.1.1.1 Balance de masa

La cantidad de masa que ingresa y que sale de un volumen de control deben ser iguales para que la cantidad de masa dentro del mismo permanezca constante (Barbosa et al., 2015). El balance de masa para un volumen de control se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

Ecuación 2.1. Balance de masa en el deshidratador.

Para el balance de masa del sistema se hace uso del diagrama de la Figura 2.3.

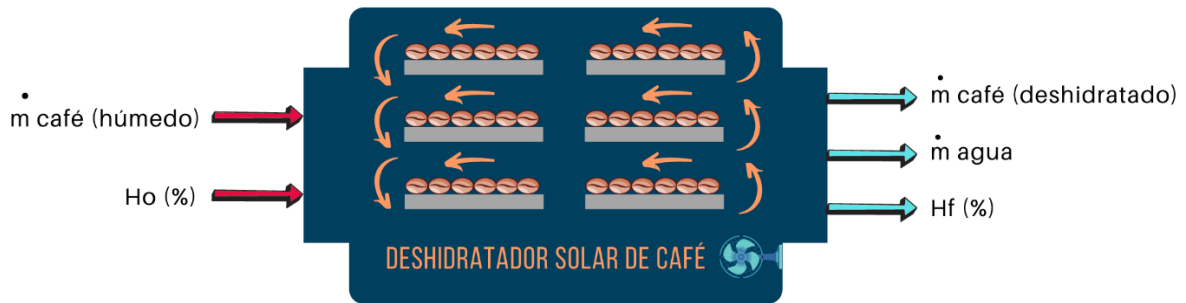


Figura 2.3. Diagrama balance de masa en el deshidratador.

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se utilizaron las siguientes ecuaciones para el desarrollo del modelo matemático del sistema.

$$H_o = \frac{\dot{m}_{agua (entra)}}{\dot{m}_{café (húmedo)}} * 100\%$$

Ecuación 2.2. Porcentaje de humedad inicial.

$$H_f = \frac{\dot{m}_{agua (sale)}}{\dot{m}_{café (seco)}} * 100\%$$

Ecuación 2.3. Porcentaje de humedad final.

$$\dot{m}_{t (agua a evaporar)} = \dot{m}_{agua (entra)} - \dot{m}_{agua (sale)}$$

Ecuación 2.4. Masa de agua a evaporar.

A partir de las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4, se obtuvo el modelo matemático del comportamiento termodinámico del deshidratador en función de la variación de humedad, como se deduce en la Ecuación 2.5.

$$\frac{d(\Delta H)}{dt} = \frac{\dot{m}_{t (agua a evaporar)} * (100 - H_f)}{[\dot{m}_{t (agua a evaporar)} + \dot{m}_{café (deshidratado)}]^2} * \dot{m}_{café (húmedo)}$$

Ecuación 2.5. Balance de masa en el deshidratador.

2.4.1.1.1.2 Balance de energía

La variación de energía dentro de un volumen de control es igual al transporte de la energía más las interacciones de calor y trabajo entre este y sus alrededores (Barbosa et al., 2015).

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

Ecuación 2.6. Primera ley de la termodinámica.

Para la obtención del modelo matemático, se utilizaron las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8.

$$\Delta E = m * C_p * \Delta T$$

Ecuación 2.7. Variación de la energía.

$$P\acute{e}rdidas = U * A$$

Ecuación 2.8. Pérdidas de calor en el deshidratador.

Con ello, se obtuvo el siguiente modelo matemático del comportamiento termodinámico del deshidratador a partir del balance de energía.

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \left(\frac{1}{m_{café} * C_{pcafé}} * \dot{Q}_{cond} \right) - \left(\frac{\dot{m}_{aire} * C_{p_{aire}}}{m_{café} * C_{pcafé}} * \Delta T \right) - \left(\frac{1}{m_{café} * C_{pcafé}} * U * A * \Delta T \right)$$

Ecuación 2.9. Comportamiento dinámico de un deshidratador de café.

Para la realización del balance de energía del sistema se utilizó el diagrama de la Figura 2.4.

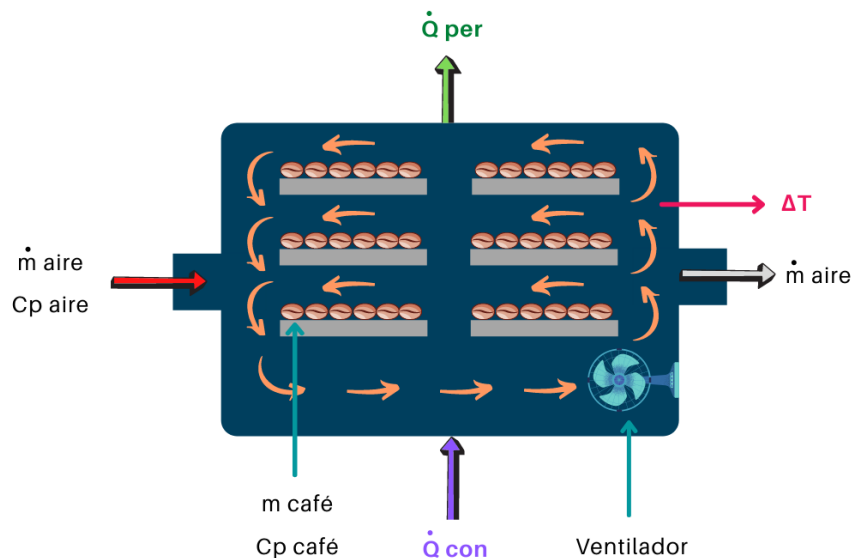


Figura 2.4. Diagrama del balance de energía del deshidratador de café.

Nota. Elaboración propia.

2.4.1.1.1.3 Eficiencia energética

El rendimiento energético es la relación entre el calor que cede el aire al café, y la energía necesaria para calentar y mover el aire en el interior del deshidratador (Galán, 2011).

$$\eta_{energética} = \frac{\dot{Q}_{cond} - (P\acute{e}rdidas * \Delta T)}{\dot{Q}_{cond}} * 100\%$$

Ecuación 2.10. Eficiencia energética del deshidratador.

2.4.1.1.2 Bomba de calor asistida por un PVT

Una bomba de calor puede ser analizada de distintas formas y una de ellas es mediante el ciclo de Carnot, el cual es uno de los ciclos termodinámicos más eficientes para convertir una determinada energía térmica en trabajo (Almeida & Peñaherrera, 2018).

2.4.1.1.2.1 Ciclo termodinámico de una bomba de calor

Las bombas de calor funcionan en base al ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Este ciclo permite transferir calor mediante el cambio de fase del refrigerante, dado que, durante el proceso, este fluido puede alcanzar altas temperaturas de condensación y bajas temperaturas de evaporación (Muñoz, 2020). Un ciclo real de una bomba de calor, como el que se indica en la Figura 2.5, difiere de uno ideal, debido a las irreversibilidades, tales como: la fricción del fluido (caídas de presión) y la transferencia de calor desde o hacia los alrededores. Adicionalmente, en la práctica, no es posible controlar el estado del refrigerante con exactitud (Almeida & Peñaherrera, 2018).

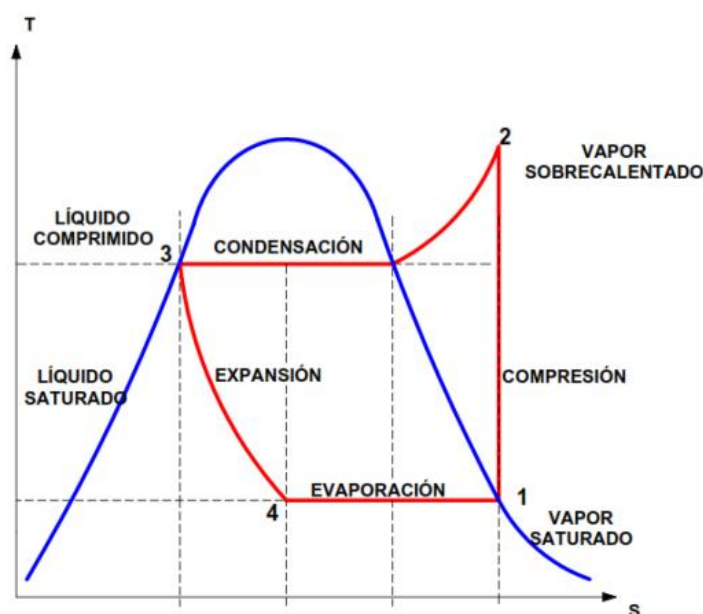


Figura 2.5. Ciclo termodinámico de la bomba de calor.

Nota. (Almeida & Peñaherrera, 2018).

El ciclo termodinámico de una bomba de calor se compone de los siguientes procesos:

Tabla 2.3. Procesos del ciclo termodinámico.

Inicio	Fin	Proceso
1	2	Compresión isentrópica en un compresor.
2	3	Rechazo de calor a presión constante en un condensador.
3	4	Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
4	1	Absorción de calor a presión constante en un evaporador.

Nota. Datos tomados de (Almeida & Peñaherrera, 2018).

2.4.1.1.2.2 Balance de energía

Se considera a la bomba de calor como la planta a ser controlada. Para la realización del balance de energía del sistema se hace uso del diagrama de la Figura 2.6.

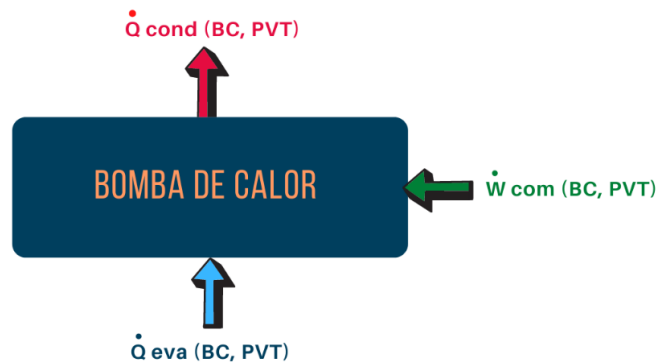


Figura 2.6. Balance de energía de una bomba de calor.

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se indica el balance de energía en términos de flujo.

$$\dot{Q}_{con (BC,PVT)} = \dot{Q}_{eva (BC,PVT)} + \dot{W}_{com (BC,PVT)}$$

Ecuación 2.11. Balance de energía de la bomba de calor.

2.4.1.1.2.3 Eficiencia energética

La eficiencia energética de una bomba de calor está definida por el coeficiente de desempeño (COP), este coeficiente se usa en lugar de la eficiencia térmica, ya que el trabajo no es una salida de las bombas térmicas, sino una entrada o consumo (Zavala, 2013). Esta ecuación es válida tanto para el ciclo ideal como real de una bomba de calor y está representado por la siguiente ecuación:

$$COP_{(BC,PVT)} = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Trabajo neto requerido}} = \frac{\dot{Q}_{con (BC,PVT)}}{\dot{W}_{com (BC,PVT)}} = \frac{\dot{Q}_{con (BC,PVT)}}{\dot{Q}_{con (BC,PVT)} - \dot{Q}_{eva (BC,PVT)}}$$

Ecuación 2.12. Coeficiente de desempeño de una bomba de calor con PVT.

2.4.1.1.3 Panel solar híbrido (PVT)

Esta tecnología es capaz de producir electricidad y calor al mismo tiempo, alcanzando un mejor desempeño en comparación con las dos tecnologías por separado. Estos módulos son capaces de aprovechar un 17,8% de la radiación solar incidente para generar electricidad y el 70% para la producción de calor de forma simultánea (Abora, 2020).

2.4.1.1.3.1 Balance de energía

En base a la Figura 2.7, es posible realizar el balance de energía del panel solar, igualando cada una de las energías que inciden sobre él, para la obtención de la Ecuación 2.13.

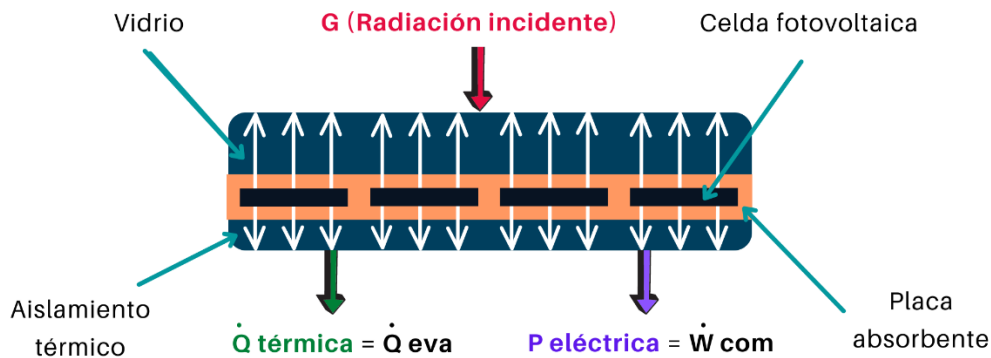


Figura 2.7. Balance de energía de un panel solar (PVT).

Nota. Elaboración propia.

$$G_{radiación\ solar} = \dot{Q}_{térmica} + P_{eléctrica}$$

Ecuación 2.13. Balance de energía de un panel PVT.

Al utilizar el panel híbrido PVT como el evaporador de la bomba de calor del sistema se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{térmica} = \dot{Q}_{eva\ (BC,PVT)} = 0,70 * G_{radiación\ solar}$$

Ecuación 2.14. Energía térmica obtenida a partir de la radiación incidente.

$$P_{eléctrica} = \dot{W}_{com\ (BC,PVT)} = 0,178 * G_{radiación\ solar}$$

Ecuación 2.15. Energía eléctrica obtenida a partir de la radiación incidente.

2.4.1.2 Análisis exergético: Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica sostiene que la energía tiene calidad, así como cantidad, y que los procesos reales ocurren en dirección de la disminución de la calidad de la energía (Cengel & Boles, 2012). El análisis exergético consiste básicamente en realizar una estimación cualitativa de las pérdidas por medio del concepto de exergía (Llerena, 2018). Para ello, inicialmente se debe determinar cuanta exergía se consume durante el proceso de deshidratación (Rodríguez, 2016). La exergía se define como la capacidad que posee un sistema cerrado para producir trabajo útil. La exergía como tal, mantiene una estrecha relación con la calidad de la energía, el medio ambiente y el desarrollo sostenible.

Es por ello, que cuando se habla de análisis exergético, es equivalente a hablar de la optimización del proceso de deshidratación. Por tal razón, en la presente investigación se busca equilibrar la eficiencia exergética con el rendimiento del equipo, en concordancia con las necesidades de los pequeños productores de café (Soto, 2018).

2.4.1.2.1 Deshidratador de bandejas

2.4.1.2.1.1 Exergía del sistema

Se calcula la exergía del sistema, mediante el uso de las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18, siendo la temperatura de referencia la temperatura ambiente (Galán, 2011).

$$Ex_{entrada} = \dot{m}_{aire} * C_{p_{aire}} * \left[(T_{entrada} - T_{ref}) - T_{ref} * \ln \left(\frac{T_{entrada}}{T_{ref}} \right) \right]$$

Ecuación 2.16. Exergía de entrada.

$$Ex_{salida} = \dot{m}_{aire} * C_{p_{aire}} * \left[(T_{salida} - T_{ref}) - T_{ref} * \ln \left(\frac{T_{salida}}{T_{ref}} \right) \right]$$

Ecuación 2.17. Exergía de salida.

$$Ex_{pérdida} = C_{p_{aire}} * \left[(T_{entrada} - T_{salida}) - T_{ref} * \ln \left(\frac{T_{entrada}}{T_{salida}} \right) \right]$$

Ecuación 2.18. Exergía pérdida.

2.4.1.2.1.2 Eficiencia exergética

Es la relación entre la exergía utilizada en el proceso de deshidratación (exergía de salida) y la exergía introducida al sistema (exergía de entrada) o la exergía del aire a la salida del deshidratador de café (exergía pérdida) (Galán, 2011).

$$\eta_{exergético} = \frac{Ex_{salida}}{Ex_{entrada}} = 1 - \frac{Ex_{pérdida}}{Ex_{entrada}}$$

Ecuación 2.19. Eficiencia exergética del deshidratador.

2.4.1.2.2 Bomba de calor asistida por un PVT

2.4.1.2.2.1 Flujos exergéticos

A continuación, se indican las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los flujos exergéticos.

$$ex\dot{Q}_{eva (BC,PVT)} = \dot{Q}_{eva (BC,PVT)} * \left(1 - \frac{T_b}{T_{panel}} \right)$$

Ecuación 2.20. Flujo exergético del evaporador.

$$ex\dot{W}_{com(BC,PVT)} = \dot{W}_{com(BC,PVT)}$$

Ecuación 2.21. Flujo exergético del compresor.

$$ex\dot{Q}_{con(BC,PVT)} = \dot{Q}_{con(BC,PVT)} * \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{secado}}\right)$$

Ecuación 2.22. Flujo exergético del condensador.

2.4.2 Desarrollo del modelo matemático en espacio de estado

Para establecer el modelo matemático se requiere por medio del espacio de estado controlar la dinámica del sistema y la respuesta de la misma.

2.4.2.1 Modelación en Sistemas Abiertos

Para la modelación, primero se discretizó el modelo matemático y se despejó las variables independientes de temperatura y humedad, de modo que cada variable se calcule durante un periodo de tiempo de simulación. A continuación, en la Figura 2.8, se indican las variables de entrada y salida del sistema identificadas en el análisis termodinámico del deshidratador solar de café, junto con las expresiones matemáticas obtenidas en el balance de energía y masa.

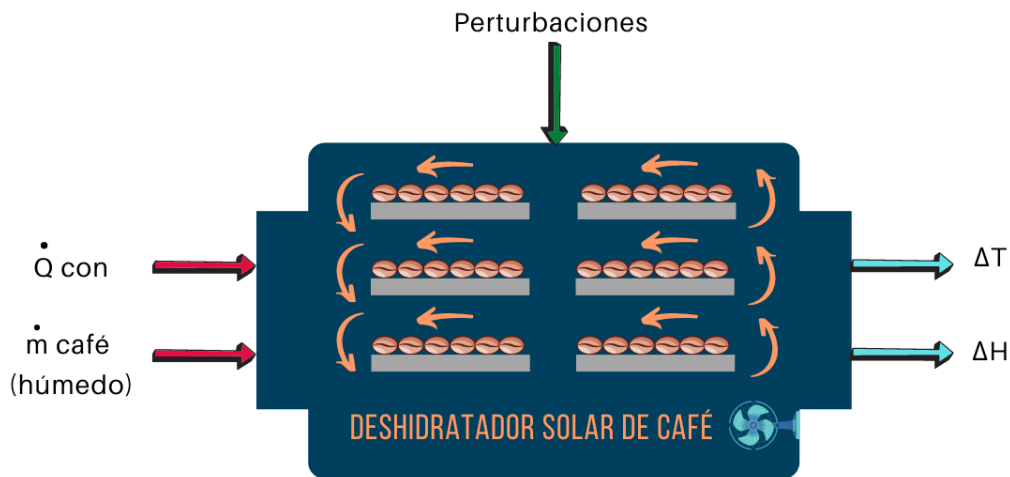


Figura 2.8. Modelo en espacio de estado.

Nota. Elaboración propia.

Balance de masa

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

$$\frac{d(\Delta H)}{dt} = \frac{\dot{m}_t(\text{agua a evaporar}) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t(\text{agua a evaporar}) + \dot{m}_{café}(\text{deshidratado})]^2} * \dot{m}_{café}(\text{húmedo})$$

Balance de energía

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \left(\frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} * \dot{Q}_{cond} \right) - \left(\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} * \Delta T \right) - \left(\frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} * U * A * \Delta T \right)$$

2.4.2.2 Modelo linealizado

Para expresar el estado del sistema a optimizar se utilizarán las matrices especiales:

- A(t): Matriz de estados
- B(t): Matriz de entrada
- C(t): Matriz de salida
- D(t): Matriz cero

A continuación, el modelo linealizado del sistema de deshidratación de café queda expresado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta T} \\ \dot{\Delta H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} - \frac{U * A}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & \frac{\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t (agua a evaporar) + \dot{m}_{café} (deshidratado)]^2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{Q}_{cond} \\ \dot{m}_{café} (húmedo) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{Q}_{cond} \\ \dot{m}_{café} (húmedo) \end{bmatrix}$$

Matrices del Sistema

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} - \frac{U * A}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & \frac{\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t (agua a evaporar) + \dot{m}_{café} (deshidratado)]^2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4.3 Hipótesis del modelo matemático

A continuación, se presentan las siguientes hipótesis consideradas en el proyecto con la finalidad de simplificar el modelo matemático.

1. El flujo de aire al igual que las transferencias de calor y masa para los distintos componentes del sistema son unidireccionales.
2. La determinación del modelo matemático del sistema en función del porcentaje de humedad se basa únicamente en el balance de masa del deshidratador.
3. La determinación del modelo matemático del sistema en función de la variación de temperatura se basa únicamente en el balance de energía del deshidratador.
4. La temperatura del grano de café es igual a la del aire que se encuentra cercano al mismo.
5. Se considera al grano de café como una esfera para la realización de los cálculos respectivos.
6. Las propiedades de cada elemento del sistema del deshidratador no cambiarán respecto a su ubicación a lo largo del deshidratador, pero si con respecto al tiempo.

2.5 Simulación numérica

En este apartado se detalla las etapas del programa de cálculo en MATLAB para la solución del modelo matemático del deshidratador solar de café.

Preprocesamiento

En esta parte, se presentan las variables de entrada al modelo matemático con sus valores correspondientes previo al cálculo de la simulación. A partir de la variación de estas variables, es posible optimizar el proceso realizando un análisis paramétrico (Masías, 2019). En la Tabla 2.4, se indican los parámetros de entrada requeridos para el desarrollo del modelo.

Tabla 2.4. Variables de entrada al modelo matemático.

Parámetros	Abreviatura	Descripción	Valores	Unidad
Provincia de Loja	$T_{amb} (mín)$	Temperatura mínima	12,20	[°C]
	$T_{amb} (máx)$	Temperatura máxima	18,90	[°C]
	$E_{solar} (Loja)$	Potencial de radiación solar	5,40	$\left[\frac{kWh}{m^2} día\right]$
	t_{sol}	Horas de sol al día	7,20	[h día]
Panel solar híbrido (aH72)	n	Número de paneles solares utilizados.	3,00	[-]
	A_{panel}	Área total del panel solar	1,96	[m ²]
	T_{panel}	Temperatura del panel solar	20,13	[°C]
	U_{PVT}	Coefficiente global de transferencia de calor del panel solar.	5,98	$\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$
Deshidratador de bandejas (MQD32BD)	$T_{mín}$	Temperatura mínima de secado	40,00	[°C]
	$T_{máx}$	Temperatura máxima de secado	90,00	[°C]

	\dot{m}_{aire}	Flujo de masa de aire	0,01	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
	Cp_{aire}	Calor específico del aire	1012	$\left[\frac{J}{kg * ^\circ C}\right]$
	g	Gravedad	9,81	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
	a	Ancho del deshidratador	0,93	$[m]$
	b	Largo del deshidratador	0,55	$[m]$
	c	Alto del deshidratador	0,795	$[m]$
	$x_{bandeja}$	Ancho de la bandeja	0,40	$[m]$
	$y_{bandeja}$	Largo de la bandeja	0,38	$[m]$
	$e_{bandeja}$	Espesor de la bandeja	0,0008	$[m]$
	k_{acero}	Conductividad térmica del acero inoxidable AISI 302.	15,1	$\left[\frac{W}{m * K}\right]$
	$W_{deshidratador}$	Potencia nominal del deshidratador.	800	$[W]$
Café arábigo	$m_{producción}$	Producción de café	200	$\left[\frac{arrobas}{año}\right]$
	$t_{disponibilidad}$	Meses de disponibilidad de café (marzo a octubre).	8,00	$[meses]$
	$t_{producción}$	Días de producción de café (laborables).	20	$[días]$
	$T_{café,máx}$	Temperatura máx. permitida	50,00	$[^\circ C]$
	$Cp_{café}$	Calor específico del café	4830	$\left[\frac{J}{kg * ^\circ C}\right]$
	H_o	Humedad inicial del café	55,00	$[\%]$
	H_f	Humedad final del café	12,50	$[\%]$
	$\rho_{café}$	Densidad del café	620	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
	$k_{café}$	Conductividad térmica del café.	0,61	$\left[\frac{W}{m * K}\right]$
	$m_{grano\ café}$	Masa del grano de café	0,00011	$[kg]$
	$g_{café}$	Grosor de la capa de café	7,00	$[mm]$
	$m_{prom\ (1\ grano)}$	Masa de un grano de café	0,11	$[g]$
Bomba de calor con PVT	$d_{café}$	Diámetro del café (Aproximación: esfera)	0,012	$[m]$
	T_{con}	Temperatura en el condensador.	50,00	$[^\circ C]$
	T_{eva}	Temperatura baja en el evaporador.	5,00	$[^\circ C]$

Nota. Fuente de referencia (Masías, 2019).

Procesamiento

En el siguiente apartado se realizó la simulación del modelo matemático en Matlab. Para ello, se discretizó el modelo matemático y se ingresaron las variables de entrada de la Tabla 2.4, para los siguientes procesos:

- Proceso 1: Calentamiento inicial del deshidratador
- Proceso 2: Control analógico de la temperatura (Control PID)

Post procesamiento

En esta etapa, se indica de forma gráfica el comportamiento de las variables independientes en función del tiempo. Para ello, se analizarán las siguientes gráficas:

- *Lazo abierto*: Variación de temperatura de calentamiento inicial en función del tiempo.
- *Lazo retroalimentado*: Variación de temperatura de secado en función del tiempo.
- *Análisis de sensibilidad paramétrica*: Variación de los parámetros geométricos y de operación del deshidratador.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez obtenido el modelo matemático que permite predecir de manera aproximada el comportamiento dinámico de un deshidratador solar de café. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el análisis, junto con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

3.1 Resultados

En esta sección del proyecto se presentan los resultados obtenidos a partir del software de simulación Matlab. En primer lugar, se indican las gráficas obtenidas en lazo abierto y retroalimentado del sistema y posteriormente se analizarán las gráficas de variación de los distintos parámetros, a fin de estimar la influencia de estos en el comportamiento del proceso de deshidratación solar de café.

3.1.1 Análisis de la Respuesta Temporal en lazo abierto

Tradicionalmente, es posible conocer el comportamiento termodinámico de un sistema físico como el deshidratador de café modelado mediante un enfoque mecatrónico, a través de la simulación del sistema en lazo abierto con una entrada de control escalón, con la finalidad de disminuir el contenido de humedad presente en el grano de café, en el sentido de que se empleará un termostato para controlar la temperatura del flujo de aire de deshidratación hasta alcanzar el valor deseado.

- **Proceso 1:** Calentamiento inicial del deshidratador solar de café con PVT

En este proceso, el sistema no se estabiliza en lazo abierto, dado que los tiempos de deshidratación son extensos y no siempre se puede apagar el equipo en el momento exacto. Para solventar este inconveniente en este proceso se hará uso de un termostato a

fin de graduar y monitorear la temperatura de calentamiento inicial desde su valor atmosférico de 18,9 [°C] (Provincia de Loja) a un valor máximo de 50 [°C], con el propósito de preservar la calidad del café y evitar a su vez que el equipo se sobrecaliente durante el proceso de deshidratación. La Figura 3.1 hace referencia al control digital automático utilizado en este proceso, en el cual, con ayuda de un termostato el compresor de la bomba de calor asistida por energía solar variará su velocidad sin apagarse al alcanzar la temperatura de timbre, es decir, la temperatura de secado del deshidratador. En este caso, al alcanzar la temperatura de timbre, el termostato apagará el compresor y cuando la temperatura descienda a un nivel inferior, el motor del compresor de la bomba de calor arrancará nuevamente. Con ello, para este proceso se determinó que el tiempo de calentamiento inicial requerido por el deshidratador solar de café bajo las condiciones anteriormente mencionadas es de 744 [s], al suministrar al sistema una potencia calórica de 3872 [W] para cubrir la deshidratación de 15,62 [kg] de café con el 55% de humedad inicial, para una variación de temperatura de 31,1 [°C] respectivamente.

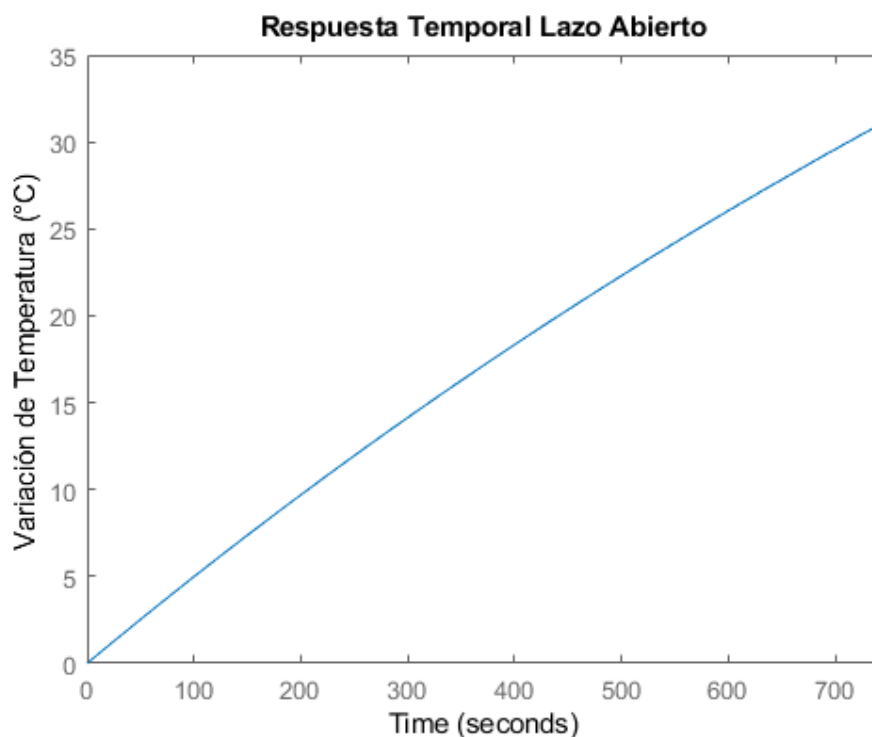


Figura 3.1. Respuesta temporal Lazo Abierto del deshidratador de café.

Nota. Elaboración propia.

3.1.2 Análisis de la Respuesta Temporal en lazo retroalimentado

Los deshidratadores de café que utilizan un termostato como mecanismo para controlar la temperatura, disponen de un sistema de control de lazo cerrado y por lo tanto poseen retroalimentación.

- **Proceso 2:** Control analógico de la temperatura de secado con PVT

En este proceso, se realiza el control automático de la temperatura de secado, la misma que debe mantenerse constante a fin de que el proceso permanezca lo más estable posible. Para lo cual, el sistema una vez encendido envía la información al controlador acerca del proceso que se está controlando y se compara con un valor dado que en este caso es la consigna de 3 [°C]. Para ello, con el objetivo de controlar la precisión del proceso de deshidratación y obtener una temperatura de secado más estable, se hace uso de un controlador PID (analógico), dado que, este posee un buen comportamiento en una extensa variedad de circunstancias. Es decir, mientras existan divergencias entre la información proporcionada al termostato y la consigna de temperatura, el controlador PID mantendrá el proceso activo hasta alcanzar el valor de la consigna dada, es decir, se puede evidenciar que es posible compensar la variación de temperatura de 3 [°C], producto de la entrada tipo escalón, estabilizando completamente el sistema en un tiempo igual a 20 [s], lo cual deja en evidencia la ventaja que posee el control analógico en comparación con el digital desde el punto de vista energético, ya que permite controlar la velocidad del compresor para que este entregue la cantidad de energía necesaria para llevar a cabo correctamente el proceso de deshidratación.

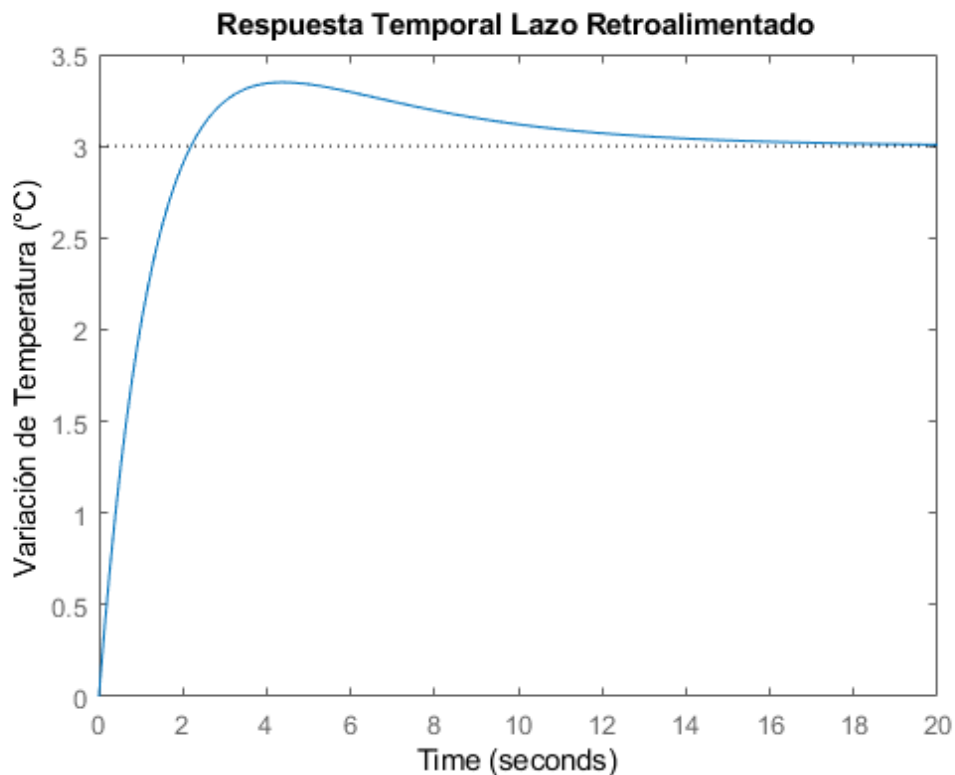


Figura 3.2. Respuesta temporal Lazo Retroalimentado del deshidratador de café.

Nota. Elaboración propia.

Para completar, si se considera una variación de temperatura en un rango de 28.1 a 31.1 [°C], se obtiene que el tiempo necesario para compensar la esta variación es de 103 [s].

3.1.3 Análisis de sensibilidad paramétrica

Para la optimización del proceso de deshidratación solar de café, en este apartado se determinará mediante la realización de un análisis de sensibilidad paramétrica la influencia que tienen los parámetros geométricos y de operación en el rendimiento del deshidratador de café, para lo cual, se llevará a cabo el análisis variando los valores de:

- Parámetros geométricos
- Parámetros de operación

A continuación, se presenta a detalle, el análisis realizado para cada una de estas variables, en donde se indicará:

Tabla 3.1. Valores representados en las gráficas.

Representación	Simulación	Descripción
●	S1	Valores utilizados antes del análisis paramétrico.
●	S2	Valores seleccionados para la optimización del sistema.

3.1.3.1 Cambio de los parámetros geométricos

3.1.3.1.1 Variación del ancho del deshidratador de café

El parámetro geométrico seleccionado en este análisis paramétrico es el ancho del deshidratador de café, en vista de que se busca optimizar el espacio de secado disponible, encontrando un valor óptimo menor a 0,93 [m] utilizado en la simulación 1 (S1).

Para ello, en la Tabla 3.2, se indican los valores a representar en la gráfica.

Tabla 3.2. Valores representados en las gráficas.

Ancho	Pérdidas	Eficiencia energética	Eficiencia exergetica	U paredes	Tiempo de calentamiento	Q con
[m]	[W]	[%]	[%]	[W/m2*°C]	[s]	[kJ]
0.23	14.5586	88.3064	54.5141	8.9424	676	2617.5
0.47	20.9691	83.1574	54.5141	9.2404	696	2694.9
0.93	33.2560	73.2886	54.5141	9.4930	744	2880.8
1.30	43.1388	65.3506	54.5141	9.5924	792	2911.7

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

Parámetros vs. Ancho del deshidratador

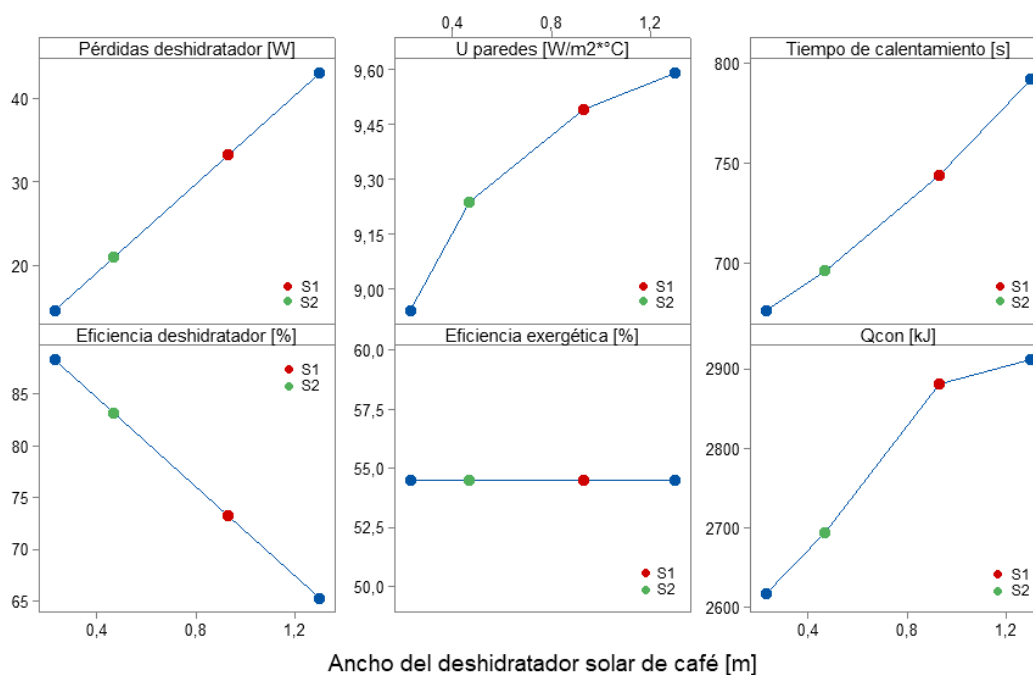


Figura 3.3. Variación de los parámetros vs. Ancho del deshidratador de café.

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 3.3, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de los parámetros al variar el ancho del deshidratador de café. En las cuales, se puede evidenciar que las pérdidas de calor, el coeficiente global de transferencia de calor de las paredes, el tiempo de calentamiento y el calor suministrado al deshidratador se incrementan a medida que aumenta el ancho del deshidratador, para lo cual se decidió trabajar con un valor cercano a 0.45 [m] (S2), a fin de disminuir el valor de cada una de estas variables y a su vez mejorar la eficiencia del deshidratador, dado que, para este valor, su eficiencia oscilaría entre un 83 y 88%. Adicionalmente, se observa que independientemente de la dimensión utilizada la eficiencia exergética (efectividad) se mantiene en un valor constante de 54.51%, indicando con ello, que las condiciones del flujo de aire durante el proceso de deshidratación solo se aprovechan hasta el valor antes mencionado.

3.1.3.2 Cambio de los parámetros de operación

En este apartado, los parámetros operaciones a analizar paramétricamente son el potencial de radiación solar, la temperatura de secado y las pérdidas de calor en el deshidratador.

3.1.3.2.1 Variación del potencial de radiación solar

En la Figura 3.4, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de los

parámetros al variar el potencial de radiación solar promedio en la Provincia de Loja. En la cual, se puede evidenciar que la potencia calórica del condensador y la eficiencia energética tanto del panel solar como del deshidratador aumentan a medida que se incrementa la radiación solar incidente en el sistema combinado. A diferencia del incremento del COP y del tiempo de calentamiento inicial, cuyos valores decrecen considerablemente. Además, el valor del COP igual a 4.93 [-] obtenido al utilizar un panel solar híbrido PVT como fuente calor permanece invariante al cambio de radiación incidente para los meses de disponibilidad de café arábigo (marzo a octubre).

Adicionalmente, se decidió trabajar con un valor de potencial solar que fluctuó entre los 5000 y 5300 [kWh/m² día], en vista de que, si bien en este rango se reduce la eficiencia energética de un 75 al 71% aproximadamente, también se da un incremento mayor de COP, lo cual es beneficioso para el presente caso de estudio, además de que en los meses que se dan radiaciones cercanas a estos valores la demanda en la producción de café en la Provincia de Loja es mayor.

Parámetros vs. Potencial de radiación solar

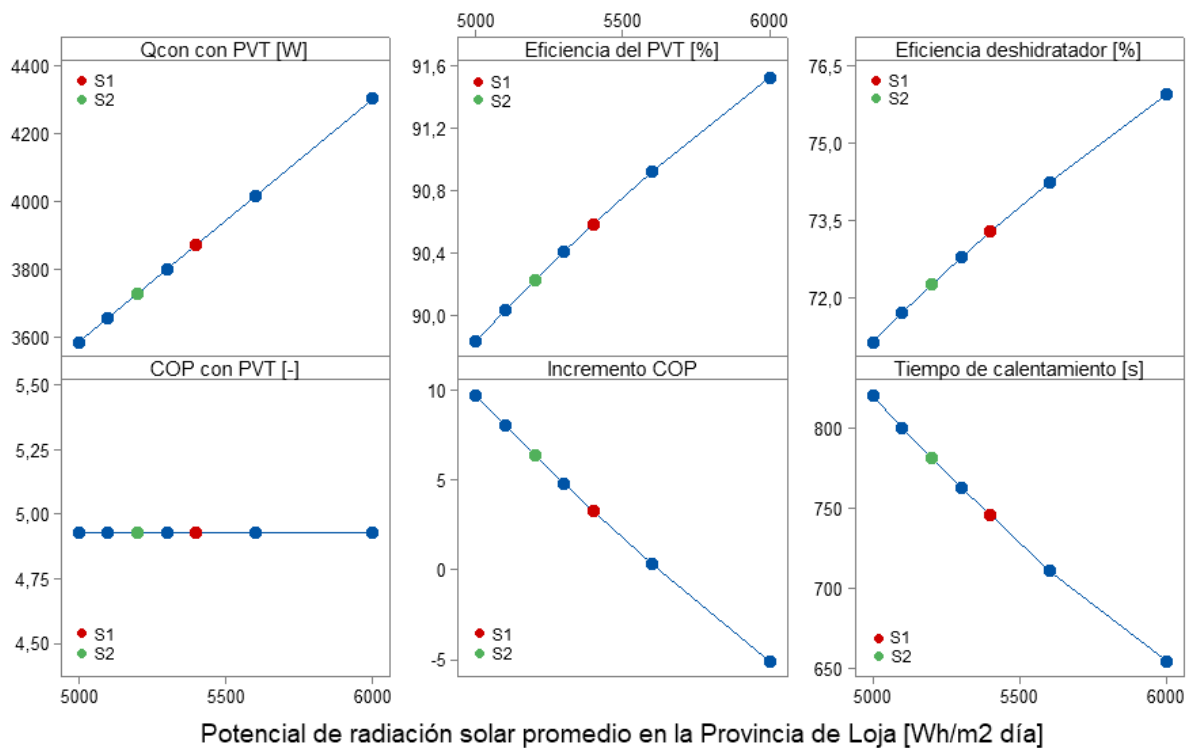


Figura 3.4. Variación de los parámetros vs. Potencial de radiación solar.

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 3.3, se indican los valores utilizados en la representación de los resultados.

Tabla 3.3. Valores representados en las gráficas.

E. solar	Q̇ con	Eficiencia PVT	Eficiencia del deshidratador	COP con PVT	Incremento COP	Tiempo de calentamiento
[Wh/m ² día]	[W]	[%]	[%]	[-]	[%]	[s]
5000	3585.2	89.8326	71.1517	4.9326	9.7087	820
5100	3656.9	90.0320	71.7173	4.9326	8.0286	800
5200	3728.6	90.2237	72.2612	4.9326	6.3993	781
5300	3800.3	90.4081	72.7846	4.9326	4.8184	763
5400	3872.0	90.5858	73.2886	4.9326	3.2837	746
5600	4015.4	90.9220	74.2426	4.9326	0.3454	711
6000	4302.2	91.5272	75.9597	4.9326	-5.0566	655

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

3.1.3.2.2 Variación de las pérdidas de calor en el deshidratador

El conocer la cantidad de calor que se pierde durante el proceso de deshidratación de café ayuda a determinar qué tan eficiente es el sistema durante el proceso. Las pérdidas de calor presentes en el análisis son por concepto de las pérdidas de calor en el interior del deshidratador (bandejas) y por el escape de calor del interior al exterior (paredes). Es por esta razón, que se realiza el análisis de este parámetro con el propósito de reducirlas y garantizar un rendimiento eficiente del equipo. En la Figura 3.5, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de los parámetros al variar la cantidad de pérdidas de calor en el sistema de deshidratación.

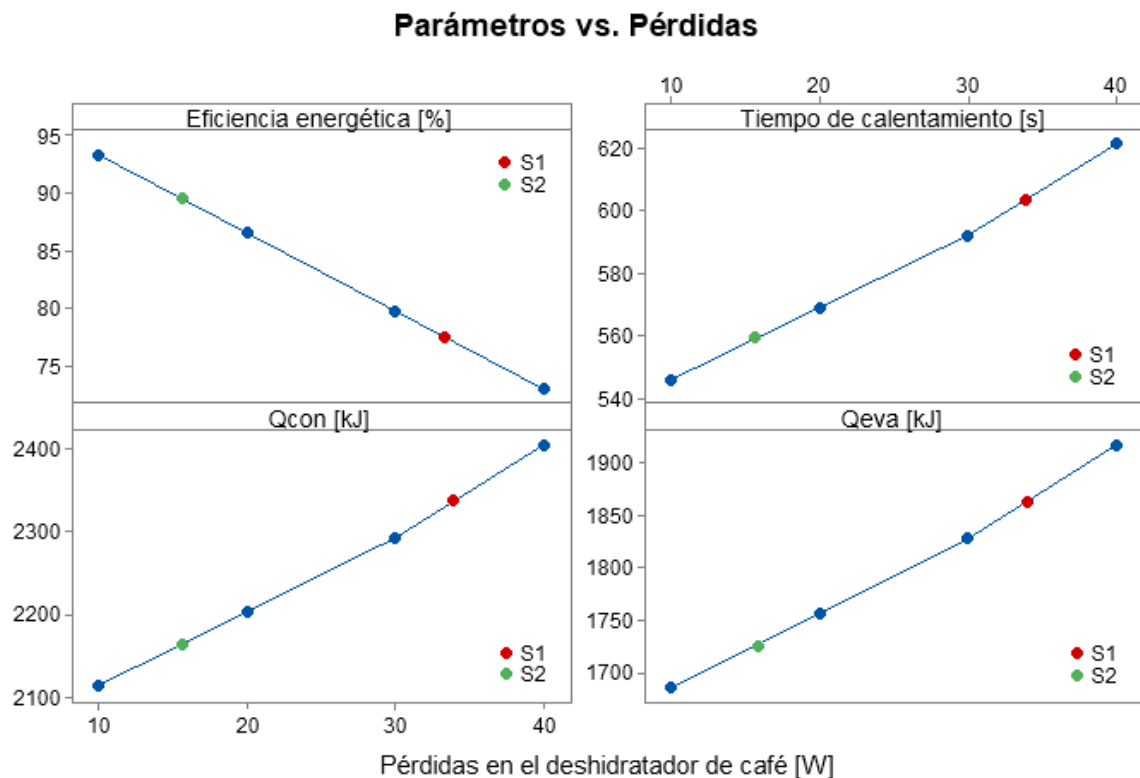


Figura 3.5. Variación de los parámetros vs. Pérdidas de calor en el deshidratador.

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 3.5, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de los parámetros al variar las pérdidas de calor en el deshidratador. En la cual, se puede evidenciar que, si se reduce el valor de las pérdidas de calor, la eficiencia energética del deshidratador aumenta considerablemente. A diferencia de las gráficas del tiempo de calentamiento inicial y del calor suministrado tanto al condensador como al evaporador, cuyos valores disminuyen significativamente. Para la optimización, se seleccionó un valor entre el 10 y 20 [W], debido a que a estos valores las condiciones de operación del deshidratador de café son favorables, dado que se alcanzaría una eficiencia energética sobre el 90%.

En la tabla 3.4, se indican los valores utilizados en la representación de los resultados.

Tabla 3.4. Valores representados en las gráficas.

Pérdidas	Eficiencia energética	Tiempo de calentamiento	Q con	Q eva
[W]	[%]	[s]	[kJ]	[kJ]
10	93.2593	546	2114.1	1685.502
20	86.5185	569	2203.2	1756.503
30	79.7778	592	2292.2	1827.504
40	73.0371	621	2404.5	1917.027

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

3.1.3.2.3 Variación de la temperatura de secado

La temperatura de secado es uno de los parámetros más importantes para garantizar la deshidratación uniforme de los granos de café. De modo que, si este parámetro no se controla, el café se deshidrataría a distintas velocidades dando lugar a la presencia de microorganismos.

En la Tabla 3.5, se indican los valores utilizados en la representación gráfica de los resultados.

Tabla 3.5. Valores representados en las gráficas.

Temperatura de secado	Pérdidas	Eficiencia energética	Eficiencia exergética	U paredes	Tiempo de calentamiento	Q con
[°C]	[W]	[%]	[%]	[W/m²*°C]	[s]	[kJ]
40	30.6196	83.3141	100	8.9359	465	1800.5
45	32.3713	78.1793	71.4156	9.2594	601	2327.1
50	33.2560	73.2886	54.5141	9.4930	744	2880.8
55	33.8983	68.3953	43.5554	9.6672	906	3508.0

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

En la Figura 3.6, se presentan las gráficas correspondientes al comportamiento de los parámetros al variar la temperatura de secado del café.

Parámetros vs. Temperatura de secado

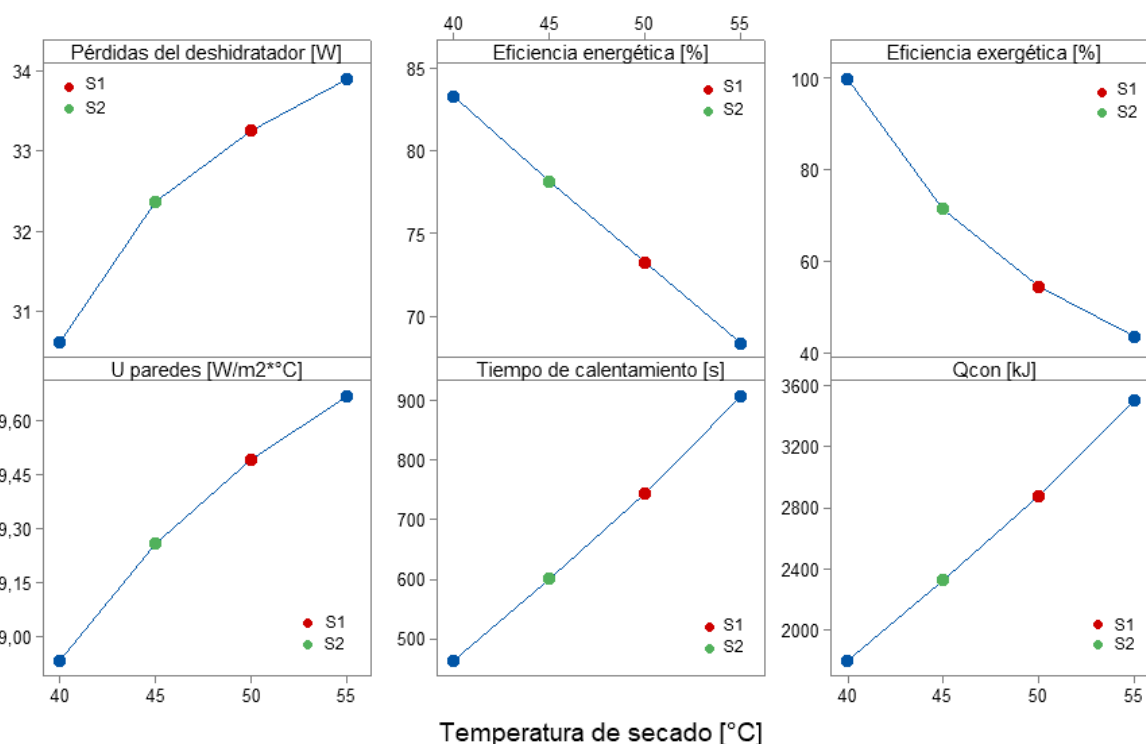


Figura 3.6. Variación de los parámetros vs. Temperatura de secado.

Nota. Elaboración propia.

En referencia a la Figura 3.6, se puede observar que, al elevar la temperatura de secado en el deshidratador, también se incrementan las pérdidas de calor, el coeficiente de transferencia de calor de las paredes, el tiempo de calentamiento inicial y el calor suministrado al condensador. Mientras que los valores de las eficiencias energética y exergética disminuyen progresivamente. Para ello, se plantea optimizar el sistema utilizando una temperatura de secado menor a 50 [°C], a fin de obtener buenas condiciones de operación sin afectar la calidad del café a deshidratar.

En vista de que, este es uno de los parámetros críticos en la optimización, se realiza un análisis más detallado para determinar de mejor manera el valor de temperatura ideal. En la Figura 3.7, correspondiente a la variación de la eficiencia energética del deshidratador en función de las pérdidas de calor para diferentes valores de temperatura de secado, se evidencia que, para un valor de pérdidas de calor igual a 10 [W], la diferencia de eficiencia energética para cada uno de los cuatro valores de temperatura de secado, disminuye considerablemente, quedando cada una de estas temperaturas dentro de un rango de eficiencia del 90 al 95%. Es decir que, si adicionalmente a la variación de temperatura de secado se reduce también el valor determinado por pérdidas de calor, es posible obtener buenas condiciones de operación del equipo.

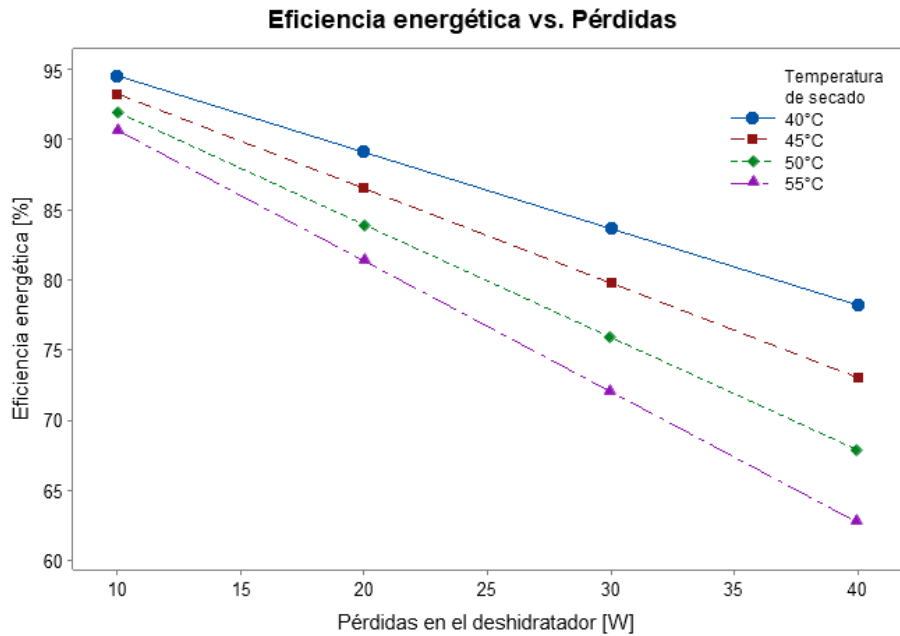


Figura 3.7. Variación de la eficiencia energética vs. Pérdidas de calor para diferentes temperaturas de secado.

Nota. Elaboración propia.

Adicionalmente, en la Figura 3.8, se observa que mientras mayor es el valor de la temperatura de secado mayor será también el calor suministrado al deshidratador con una variación mínima a lo largo de las pérdidas de calor en el deshidratador.

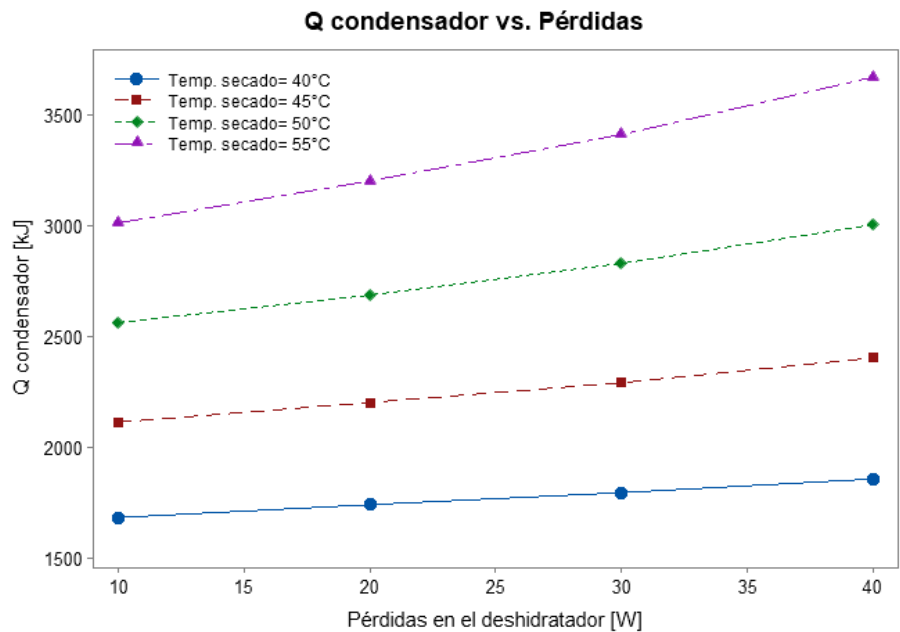


Figura 3.8. Variación del calor suministrado al condensador vs. Pérdidas de calor para diferentes temperaturas de secado.

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 3.6, se indican los valores utilizados en la representación de los resultados.

Tabla 3.6. Valores representados en las gráficas.

Temperatura de secado [°C]	Pérdidas [W]	Eficiencia energética [%]	Tiempo de calentamiento [s]	Q con [kJ]
40	10	94.5506	435	1684.3
	20	89.1012	450	1742.3
	30	83.6518	464	1796.6
	40	78.2024	480	1858.6
45	10	93.2593	546	2114.1
	20	86.5185	569	2203.2
	30	79.7778	592	2292.2
	40	73.0371	621	2404.5
50	10	91.9679	662	2563.3
	20	83.9359	694	2687.2
	30	75.9038	731	2830.4
	40	67.8717	776	3004.7
55	10	90.6766	778	3012.4
	20	81.3532	827	3202.1
	30	72.0298	881	3411.2
	40	62.7064	948	3670.6

En adición a lo expuesto en las Figuras 3.7 y 3.8, se puede observar con la ayuda de la Figura 3.9, que al incrementar el valor de la temperatura de secado también aumentará el tiempo de calentamiento inicial requerido por el deshidratador de café, puesto que, el valor de variación de temperatura a alcanzar también es mayor.

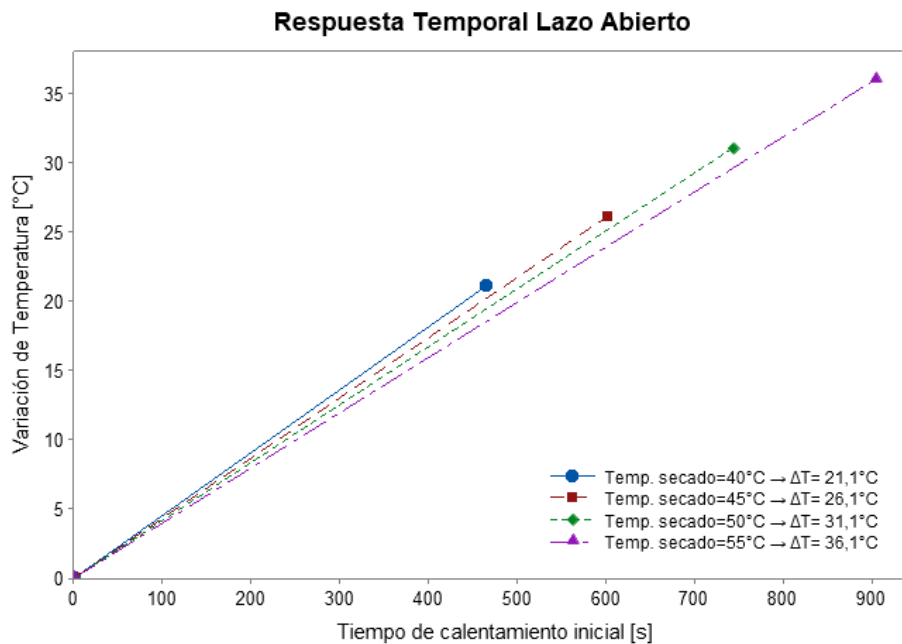


Figura 3.9. Respuesta temporal en Lazo abierto para diferentes temperaturas de secado.

Nota. Elaboración propia.

En referencia a lo expuesto anteriormente, se decidió optimizar el deshidratador de café, empleando una temperatura igual a 45 [°C], dado que, a este valor se obtienen buenas condiciones de operación, además de que no se supera la temperatura máxima permisible del grano de café igual a 50 [°C].

3.1.4 Coeficientes optimizados

Gracias al análisis de sensibilidad paramétrico realizado se determinaron las condiciones de operación óptimas para correcto funcionamiento del deshidratador de café. A continuación, en la Tabla 3.7, se presentan los resultados obtenidos antes y después del análisis paramétrico.

Tabla 3.7. Resultados de las simulaciones 1 y 2.

Parámetro	Unidad	Simulación		Diferencia [%]
		1	2	
Potencial de radiación solar (Loja)	$\frac{kWh}{m^2} \text{ día}$	5.40	5.20	3.70
Radiación incidente	[Wh día]	4410.00	4246.70	3.70
Energía térmica	[W]	3087.00	2972.70	3.70
Potencia eléctrica	[W]	784.98	755.91	3.70
Ancho del secador	[m]	0.93	0.42	54.84
Largo del secador	[m]	0.55	0.53	3.64
Alto del secador	[m]	0.795	0.71	10.69
Masa de café húmedo	[kg]	15.63	15.63	0.00
Masa de café deshidratado	[kg]	8.04	8.04	0.00
Área de secado	[m ²]	4.80	3.00	37.50
Pérdidas de calor	[W]	33.26	15.80	52.48
Temperatura de secado	[°C]	50.00	45.00	10.00
Temperatura de timbre	[°C]	31.10	26.10	16.08
Menor temperatura secado	[°C]	28.10	23.10	17.79
Tiempo subida temperatura	[s]	103.00	72.00	30.10
Potencia calórica compresor con PVT	[W]	784.98	755.91	3.70
Potencia calórica evaporador con PVT	[W]	3087.00	2972.70	3.70
Potencia calórica condensador PVT	[W]	3872.00	3728.60	3.70
Potencia calórica compresor sin PVT	[W]	3020.60	2908.70	3.70
Potencia calórica evaporador sin PVT	[W]	800.00	800.00	0.00
Potencia del condensador sin PVT	[W]	3820.60	3708.70	2.93
Tiempo de calentamiento inicial (tci)	[s]	744.00	582.00	21.77
Calor suministrado al condensador	[kJ]	2880.80	2170.00	24.67
Calor suministrado al evaporador	[kJ]	2296.72	1730.09	24.67
Tiempo de control (tcc)	[s]	20.00	20.00	0.00
Eficiencia del panel PVT	[%]	90.59	91.79	1.32
Eficiencia del deshidratador	[%]	73.29	88.94	21.35
COP con PVT	[-]	4.78	4.64	2.93
COP sin PVT	[-]	4.93	4.93	0.00
Incremento de COP	[%]	3.28	6.39	94.82
Exergía de entrada	[W]	128.02	97.72	23.67
Exergía de salida	[W]	69.79	69.79	0.00
Exergía pérdida	[W]	58.23	27.93	52.04
Eficiencia exergética	[%]	54.51	71.42	31.02

Flujo exergético del evaporador	[W]	2320.20	2234.30	3.70
Flujo exergético del compresor	[W]	784.98	755.91	3.70
Flujo exergético del condensador	[W]	2408.40	2162.60	10.21
Consumo energético por día	[kWh]	62.22	59.79	3.91
Kp	[-]	7.41e+04	7.41e+04	0.00
Ki	[-]	1.46e+04	1.46e+04	0.00
Filtro de tiempo	[-]	1,00	1,00	0.00

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

En referencia de la Tabla 3.7, se evidenció que al simular el modelo matemático con los coeficientes optimizados se puede mejorar significativamente el rendimiento del proceso de deshidratación, dado que, al reducir el ancho del deshidratador de un 0.93 a 0.42 [m], el potencial de radiación solar de 5.4 a 5.2 [kWh/m² día], las pérdidas de calor de 33.26 a 15.80 [W] y la temperatura de secado de 50 a 45 [°C], se consiguió disminuir un 21.77% el tiempo de calentamiento inicial y un 24.67% el calor suministrado al deshidratador de café. Mientras, se obtuvo un incremento de 21.35% en la eficiencia energética del deshidratador, un 1.32% la eficiencia del panel PVT, un 31% la eficiencia exergética y finalmente un aumento de 94.82% del valor del COP. En la Figura 3.10 para el calentamiento inicial del deshidratador de café en lazo abierto, se determinó que el tiempo de calentamiento inicial requerido por el deshidratador solar de café bajo las condiciones mencionadas anteriormente es de 582 [s] al suministrar al sistema una potencia calorífica de 3728.6 [W]. Para lo cual, para el tiempo indicado anteriormente es necesario entregar al aire una energía calorífica de 2170 [kJ], para deshidratar la misma cantidad de café de 15,62 [kg] de café con el 55% de humedad inicial, para una variación de temperatura de 26,1 [°C], respectivamente.

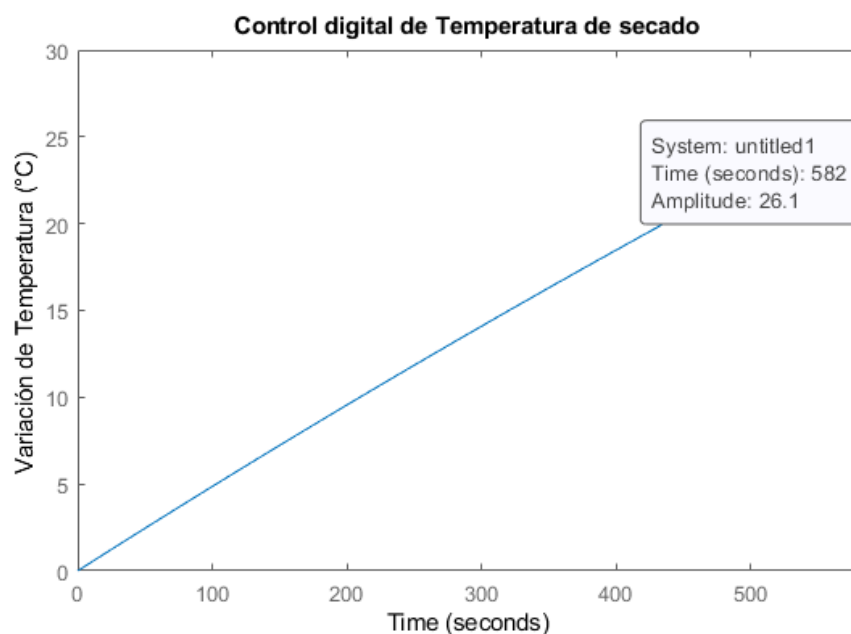


Figura 3.10. Respuesta temporal Lazo Abierto del deshidratador con los valores optimizados.

Nota. Elaboración propia.

Además, de que se evidenció una disminución del 3,91% en el consumo energético al reducir las pérdidas de calor en el interior y en las paredes del deshidratador de café. Para complementar el análisis, de la Figura 3.11, se obtiene que el tiempo necesario para compensar la variación de temperatura en el rango de 23.1 a 26.1 [°C] es de $\Delta t=72$ [s].

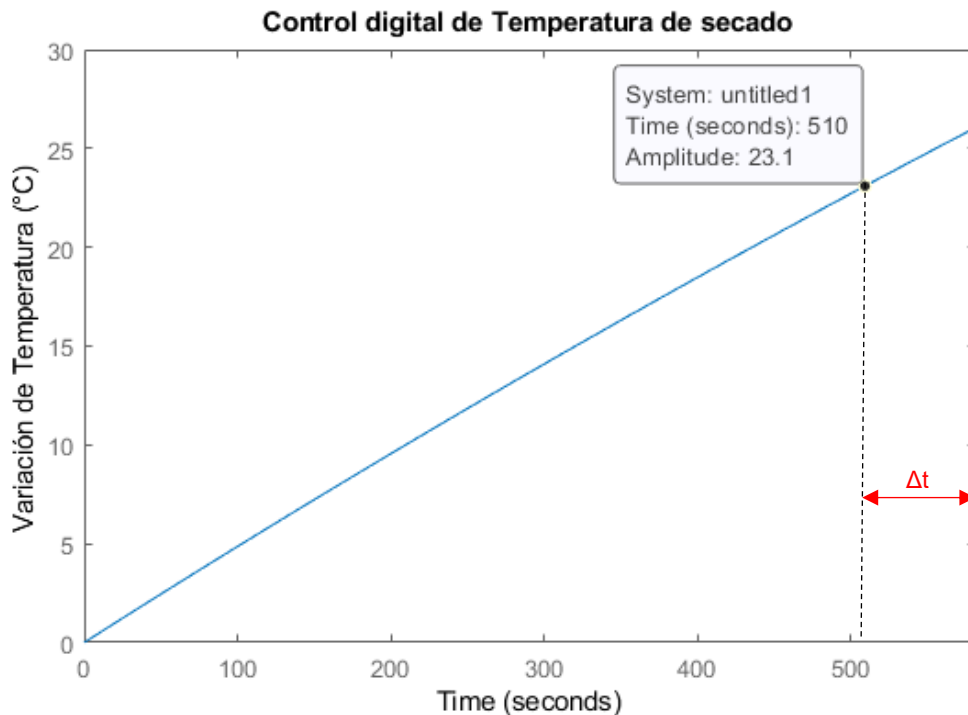


Figura 3.11. Respuesta temporal Lazo Abierto para una variación de temperatura de 3°C.

Nota. Elaboración propia.

3.2 Conclusiones

En el presente Trabajo de Integración Curricular se evidenció que el uso del enfoque mecatrónico para optimizar el proceso de deshidratación a través de la modelación matemática, simulación numérica y control de los parámetros críticos de operación, es un método que da buenos resultados, en vista de que, permite el análisis y valoración de las eficiencias energética y exergética del proceso de deshidratación de café a fin de mejorar el desempeño del mismo.

Se determinó que el control analógico en sistemas térmicos y termodinámicos (nivel de temperatura) presenta grandes ventajas con respecto al digital, debido a que este control al tener retroalimentación se adapta adecuadamente a diferentes masas o volúmenes del sistema, incrementando significativamente la eficiencia del sistema termodinámico. Mientras, el control digital (lazo abierto) requiere de un sensor de temperatura (termóstato) para apagar y encender nuevamente la fuente de calor. El tiempo que permanecerá

encendido el compresor corresponde al obtenido en la simulación de 20 [s].

Se demostró que la utilización de un controlador PID, es una forma adecuada de solventar los problemas de deshidratación comunes, dado que permite encontrar los parámetros óptimos de operación, brindando la opción de elegir el que más se ajuste a los requerimientos del proceso en referencia a la zona de estudio, que en este caso son los pequeños productores de la Provincia de Loja.

Se concluyó a través del modelo matemático propuesto que, al disminuir el valor de la temperatura de secado, las pérdidas de calor, las dimensiones del deshidratador y con ello el área de transferencia de calor, se consiguió reducir el valor del tiempo de calentamiento inicial, al igual que el calor suministrado al deshidratador. Mientras, que los valores de las eficiencias energéticas (deshidratador y panel PVT), la eficiencia exergética y COP se incrementaron significativamente.

Se determinó mediante la realización de la simulación numérica en Matlab, que el modelo matemático propuesto responde adecuadamente a la variación tanto de los parámetros geométricos como de operación, ya que permite disminuir el porcentaje de pérdidas presente en el proceso, sin afectar considerablemente el resto de variables. Por lo cual, para la simulación 2, se cambiaron las dimensiones del deshidratador de uno de 32 bandejas a uno de 20 bandejas para deshidratar la misma cantidad de café, pero con una mayor eficiencia energética y exergética.

En referencia al análisis realizado se determinó que, con las modificaciones realizadas en los parámetros fue posible reducir el consumo energético del deshidratador, dado que con estas variaciones se incrementa a su vez la eficiencia energética del mismo.

Se evidenció que la radiación incidente en el panel solar (PVT) presentará un porcentaje de pérdidas de energía debido a la cubierta, la estructura del panel y los materiales utilizados en el mismo. Es por ello, que para la modelación del sistema se consideró únicamente un aprovechamiento máximo de energía solar del 87,8%, siendo un 17,8% para generar electricidad y un 70% para la producción de energía térmica.

Finalmente, cuando se estudia un sistema térmico es importante conocer qué tan eficiente es y cuánta energía consume, por lo cual una de las alternativas más eficientes para reducir el consumo energético en el proceso de deshidratación de café, es mediante el uso de deshidratadores con bomba de calor asistidos por energía solar, dado que estos permiten conservar de mejor manera las propiedades del café, convirtiéndose en una alternativa sustentable con el medio ambiente, ya que se reduce el consumo de combustibles fósiles.

3.3 Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones del Trabajo de Integración Curricular desarrollado, se evidenció que es muy importante al momento de desarrollar el modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema, considerar los parámetros climáticos de la zona de estudio a fin de obtener un modelo específico y aproximado de acuerdo a la zona cafetera del país donde se requiera la optimización.

Es necesario compensar la disminución de energía proveniente del sol debido a las condiciones climáticas variables, mediante la implementación y uso de una fuente de energía alternativa como una bomba de calor, al ser equipos de alta eficiencia y ser ecológicamente recomendables.

Es importante realizar un análisis de sensibilidad paramétrica del proceso, con la finalidad de evaluar la influencia que tienen los parámetros tanto geométricos como de operación para ajustar los parámetros óptimos a los que operará el sistema de deshidratación y con ello, disminuir las pérdidas de calor del proceso a fin de aprovechar al máximo la energía proveniente del sol.

Es recomendable el uso de un controlador PID (analógico), dado que permite controlar con mayor precisión el proceso de deshidratación y obtener una temperatura de secado más estable.

Es necesario estudiar la influencia de los parámetros de operación en forma conjunta y no de forma aislada, debido a que la variación de uno afecta significativamente al comportamiento de los demás. Por lo cual, la optimización del proceso debe realizarse con cautela para asegurar la calidad del producto deshidratado.

Es indispensable validar experimentalmente los coeficientes optimizados mediante el desarrollo de un prototipo a fin de que esta herramienta pueda ser utilizada no solo en la optimización de procesos de deshidratación, sino que también en la validación de sistemas ya vigentes, para una mejora significativa de la eficiencia energética del proceso.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abora. (2020). *Ficha Técnica abora aH72 SK*. www.abora-solar.com

Aguinaga, Á. (2009). *Aprovechamiento holístico de la mecatrónica en los procesos de manufactura industriales*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9370>

- Almeida, E., & Peñaherrera, X. (2018). *Diseño e implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos con capacidad de 35 (kWh/mes) para transmitir la energía eléctrica generada al compresor de una bomba de calor.* <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16378/1/UPS-ST003818.pdf>
- Barbosa, J., Gutiérrez, C., & Jiménez, J. (2015). *Termodinámica para ingenieros* (1st ed.). Grupo Editorial Patria.
- Bejarano, C. (2018). *Evaluación del efecto del uso de un deshidratador solar pasivo indirecto de flujo turbulento y de un deshidratador solar pasivo en propiedades fisicoquímicas y organolépticas de mango, naranja y mandarina.* <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68688/1018425494.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Besora, J. (2017). *Informe Técnico para la construcción de un secador de café.* <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-t%C3%A9cnico-secador-solar-de-caf%C3%A9.pdf>
- Cáliz, S. A. (2016). *Determinación de la eficiencia por segunda ley, del secado por convección de tomate y piña en un secador de túnel.* <https://ribuni.uni.edu.ni/1364/1/80580.pdf>
- Carbonell, M. (2021). *Captadores solares térmico.* Hogarsense. <https://www.hogarsense.es/energia-solar/captador-solar-termico>
- Castrillo, A., & Pinto, O. (2019). *Diseño de controlador PID para prototipo de máquina de secado de café y/o cacao para la empresa Penagos Hermanos.* https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7073/2019_Tesis_Andrea_Carolina_Castrillo_Fuentes.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CEFA Ecuador. (2019). *Café.* <https://cefaecuador.org/productos/cafe/>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (7ma ed.). Mc Graw Hill. www.FreeLibros.me
- Climate-Data.org. (2021). *Clima Loja (Ecuador).* <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-loja/loja-4233/>
- Díaz, L. (2016). *Diseño, construcción y análisis energético de paneles solares de aire forzado para un horno de deshidratado de frutas.* <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16727/1/CD-7307.pdf>
- EcuRed. (2019). *Loja (Ecuador).* [https://www.ecured.cu/Loja_\(Ecuador\)#Ubicaci.C3.B3n](https://www.ecured.cu/Loja_(Ecuador)#Ubicaci.C3.B3n)
- Energcity S.A. (2019). *Beneficios económicos y tributarios de la Energía Solar en Ecuador.* Energía Limpia. <https://energitysa.com/blog/beneficios-economicos-y-tributarios-de-la-energia-solar-en-ecuador/>
- Galán, N. (2011). *Optimización energética de un secadero industrial.* <https://zaguan.unizar.es/record/5778/files/TAZ-PFC-2011-201.pdf>

- GasFrioCalor. (2019). *Diferencias entre paneles solares térmicos y fotovoltaicos*.
<https://solarplak.es/energia/diferencias-entre-paneles-solares-termicos-y-fotovoltaicos/>
- Inarquia. (2021). *Paneles Solares Híbridos para ACS y Electricidad*.
<https://inarquia.es/paneles-hibridos-acs-electricidad/>
- ISF. (2017). *Deshidratadores Solares. Tecnologías Apropriadas Para La Agricultura*.
<https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual-Tecnologia-para-la-Transformacion-Agropecuaria-Deshidratador-Solar-ESF-1.pdf>
- Llerena, O. (2018). Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo. *Ingenius No. 19*. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.03>.
- Luciani, Á., & Alzate, J. (2015). *Ensamble, puesta a punto y operación de secador mecánico de café con acople de bomba de calor*.
https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/1630/Rep_ltm_pre_c3%81ngel.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marroquín-Cano, S., Ruiz-Arroyo, J., Robles-Ocampo, J., & Sevilla-Camacho, P. (2017). Diseño y construcción de un deshidratador solar indirecto de mango ataulfo por convección forzada. *Junio*, 1(2), 9–18.
https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Innovacion_Sistematica/vol1num2/Revista_de_Innovacion_Sistem%C3%A1tica_V1_N2_2.pdf
- Martínez, X. (2019). La Multidisciplinariedad en la Mecatrónica. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0*, 1(2), 12–13. <https://ojs.docentes20.com/index.php/revista-docentes20/article/view/45>
- Masías, L. (2019). *Diseño de un secador solar directo de circulación natural tipo invernadero para cacao*.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4234/IME_270.pdf
- Merino, I. (2020). *Análisis del desempeño de paneles híbridos PST-PV para aplicaciones en industria y comercio*.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/179540/Analisis-del-desempe%C3%B1o-de-paneles-hibridos-PST-PV-para-aplicaciones-en-industria-y-comercio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz, C. (2020). *Evaluación técnica y económica de bombas de calor asistidas por energía solar en expansión directa, para producción de agua caliente sanitaria*.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176066/Evaluaci%C3%B3n-t%C3%A9cnica-y-econ%C3%B3mica-de-bombas-de-calor-asistidas-por-energ%C3%ADa-solar-en-expansi%C3%B3n-directa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Parra, P., Saavedra, R., & Ipanaqué, W. (2012). *Modelación y Simulación en ambiente Ecosimpro de una Cámara de Secado para Cacao*.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554812007>
- Pérez, H. (2015). *Física general* (5th ed.). Grupo Editorial Patria.
- Rikolto. (2021). *Café ecuatoriano, aromatizando la economía nacional*. Proyectos.
<https://latinoamerica.rikolto.org/es/project/cafe-ecuatoriano-aromatizando-la-economia-nacional>
- Roa, G., & Ortega, D. (2011). *Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala, para el Secado de café para la Universidad Nacional de Loja*.
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12368/1/Ortega%20Torres%20Diego%20Bladimir%20Roa%20Mar%C3%ADn%20Germ%C3%A1n%20Leonardo.pdf>
- Robles, L. (2015). *Análisis teórico de la industria del café en Ecuador y su relación con el cambio en la matriz productiva*.
<http://201.159.223.2/bitstream/123456789/1479/1/Robles%20Luis%20Paper%202092015%20.pdf>
- Rodríguez, B., Villanueva, E., Partida, A., & Avitia, P. (2017). Diseño de un control de temperatura con técnicas de control clásico, para optimizar el proceso de deshidratado en un deshidratador solar. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, 37–46.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol3num10/Revista_de_Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica_V3_N10_5.pdf
- Rodríguez, F. (2016). *Optimización de un secador solar basado en el método de análisis exergético*.
<https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/702/145.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Santana, L., & Cubillos, D. (2016). *Propuesta de diseño de un deshidratador tipo bandeja para la producción de frutas orgánicas tipo snacks para Ecovital orgánico*.
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/451/1/6111616-2016-2-IQ.pdf>
- SolarPlak. (2021). *Diferencias entre Energía Solar Térmica y Fotovoltaica*.
<https://www.gasfriocalor.com/blog/comparativas-de-productos-o-aparatos/diferencias-entre-energia-solar-termica-y-fotovoltaica/>
- Soto, A. (2018). *Evaluación y optimización energética y exergética de sistemas de refrigeración por absorción*.
https://oa.upm.es/50040/1/TFG_ALICIA_SOTO_ROBLES.pdf

- TechnoServe. (2021). *BENEFICIOS Y MERCADOS DEL CAFÉ ¿Qué defectos debo evitar?* <https://mocca.org/wp-content/uploads/2021/08/poscosecha-y-beneficio.pdf>
- Toledo, D. (2015). *Estudio de las características organolépticas del café que se procesa en las casas cafetaleras en la Provincia de Loja.* <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21884/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>
- Toledo-Macas, R., Zumba-Zúñiga, M., & Martínez-Fernández, V. (2019). *La denominación de origen como estrategia de comercialización de productos agroalimentarios. El caso del café de altura de la Provincia de Loja, Ecuador.* https://www.researchgate.net/publication/333045232_LA_DENOMINACION_DE_ORIGEN_COMO ESTRATEGIA_DE_COMERCIALIZACION_DE_PRODUCTOS_AGROALIMENTARIOS_EL_CASO_DEL_CAFE_DE_ALTURA_DE_LA_PROVINCIA_DE_LOJA_ECUADOR
- UIN. (2020). Desarrollo del proyecto mediante el enfoque sistémico. *Integración Del Diseño Arquitectónico.* https://repositorio.scalahed.com/recursos/files/r171r/w26930w/IntegracionDisenoArquitectonico_Ant_B4_C.pdf
- Vaca-Revelo, D., & Ordoñez, F. (2019). *Mapa Solar del Ecuador.* https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf
- Vásquez, G. (2017). *Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao.* https://pirhua.udel.edu.pe/bitstream/handle/11042/3234/IME_227.pdf?sequence
- Weather Spark. (2021). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Loja (Ecuador).* <https://es.weatherspark.com/y/19339/Clima-promedio-en-Loja-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-SolarEnergy>
- Zavala, O. (2013). *Secado con bomba de calor para la deshidratación de frutas.* https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/8986/ZavalaCerna_O.pdf?sequence=1&isAllowed=y

5 ANEXOS

En esta sección se presentan los productos correspondientes a cada uno de los objetivos específicos propuestos para este proyecto.



Trabajo de
Integración
Curricular

PRODUCTOS

Optimización
energética y exérgica
de un deshidratador solar
de café a partir
de un enfoque
multidisciplinario

EVELYN CHIRIBOGA

DT1 – TC1



INFORME No. 1

El presente informe se realiza con la finalidad de dar a conocer el desarrollo de las actividades realizadas en cumplimiento con el objetivo específico 1 para la presentación del Trabajo de integración Curricular, correspondiente a “Optimización energética y exergética de un deshidratador solar de café a partir de un enfoque multidisciplinario”.

Recopilación bibliográfica

Se recolectó la información necesaria que aporte con los conocimientos teóricos necesarios para llevar a cabo la investigación. Para ello, se estableció la siguiente base de datos:



Figura 5.1. Recopilación bibliográfica.

Análisis, evaluación y selección de la bibliografía

Para este apartado se siguió el procedimiento de la Figura 5.2, como se indica a continuación:

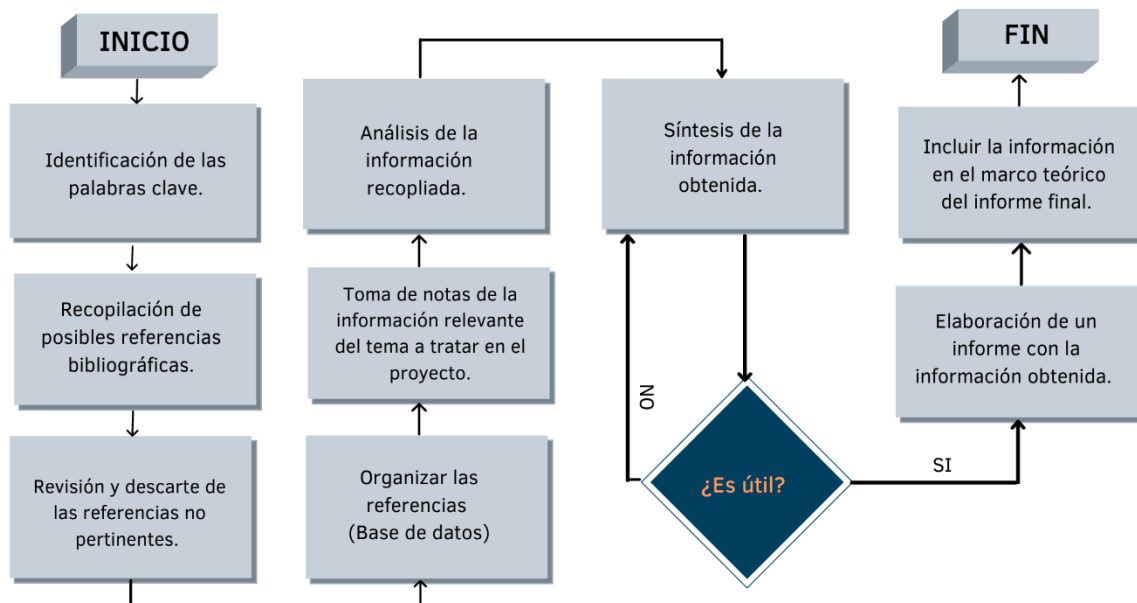


Figura 5.2. Procedimiento a seguir para la recopilación bibliográfica de la información.

Nota. Elaboración propia.

Respuesta a la pregunta de investigación

¿Es posible reducir el consumo energético de un deshidratador solar de café asistido por una bomba de calor mediante la modelación matemática y simulación numérica del sistema, sin afectar las propiedades del producto final?

Si es posible, dado que los resultados obtenidos mediante modelación matemática y simulación numérica permiten gestionar de manera eficiente el consumo energético del proceso mediante el monitoreo y control de cada una de las variables involucradas en el mismo. Siendo el medio ambiente uno de los principales beneficiarios, en vista de que, se busca conseguir una considerable disminución del consumo energético, sin perder las propiedades del café, de modo que, los pequeños productores de la provincia de Loja puedan producir un café de una calidad óptima y con ello ser más competitivos en el mercado nacional.

INFORME No. 2

El presente informe se realiza con la finalidad de dar a conocer el desarrollo del modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema en espacio de estado de un deshidratador de café en cumplimiento del objetivo específico 2 para la presentación del Trabajo de integración Curricular, correspondiente a “Optimización energética y exergética de un deshidratador solar de café a partir de un enfoque multidisciplinario”.

Conservación de la masa

La masa que entra a un volumen de control debe ser igual a la masa que sale de este para que la masa dentro del volumen de control permanezca constante (Barbosa et al., 2015). Para ello, es necesario sumar todos los flujos másicos que entran al mismo:

$$\sum \dot{m}_{entra} - \sum \dot{m}_{sale} = \Delta \dot{m}_{sistema}$$

Ecuación 5.1. Balance de masa (flujos másicos).

El balance de masa para un volumen de control puede expresarse como:

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

Ecuación 5.2. Balance de masa.

Para la realización del balance de masa del sistema se hace uso del diagrama de la figura 5.3.

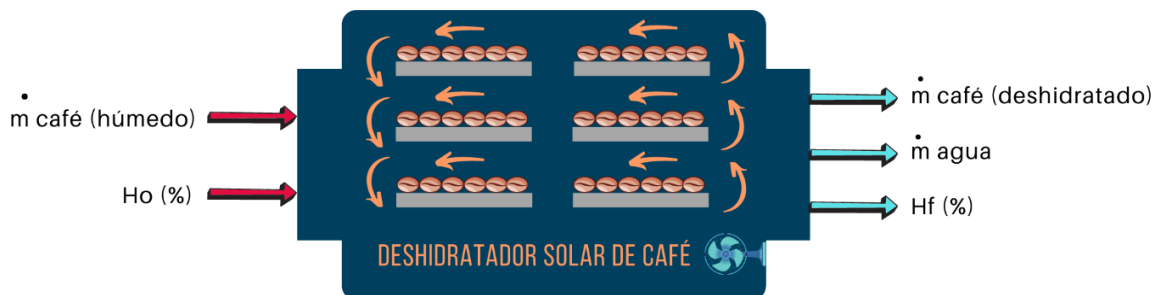


Figura 5.3. Diagrama del sistema.

Nota. Elaboración propia.

Para determinar la humedad inicial y final del sistema se emplean las siguientes ecuaciones:

$$H_o = \frac{\dot{m}_{agua (entra)}}{\dot{m}_{café (húmedo)}} * 100\%$$

Ecuación 5.3. Porcentaje de humedad inicial.

$$H_f = \frac{\dot{m}_{agua (sale)}}{\dot{m}_{café (seco)}} * 100\%$$

Ecuación 5.4. Porcentaje de humedad final.

A continuación, se indica el procedimiento para obtener el modelo paramétrico a partir del balance de masa.

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) = \dot{m}_{agua (entra)} - \dot{m}_{agua (sale)}$$

Reemplazando las ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) = \frac{\dot{m}_{café (húmedo)} * H_o}{100} - \frac{\dot{m}_{café (deshidratado)} * H_f}{100}$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) = \frac{\dot{m}_{café (húmedo)} * H_o}{100} - \frac{[\dot{m}_{café (húmedo)} - \dot{m}_{agua}] * H_f}{100}$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) = \frac{\dot{m}_{café (húmedo)} * H_o}{100} - \frac{\dot{m}_{café (húmedo)} * H_f}{100} + \frac{\dot{m}_{agua} * H_f}{100}$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) * \left(1 - \frac{H_f}{100}\right) = \dot{m}_{café (húmedo)} * \left(\frac{H_o}{100} - \frac{H_f}{100}\right)$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) * \left(\frac{100 - H_f}{100}\right) = \dot{m}_{café (húmedo)} * \left(\frac{H_o - H_f}{100}\right)$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f) = \dot{m}_{café (húmedo)} * (H_o - H_f)$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f) = \dot{m}_{café (húmedo)} * \Delta H$$

$$\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f) = \dot{m}_{café (húmedo)} * \frac{d(\Delta H)}{dt}$$

Multiplicar por $\dot{m}_{café (húmedo)}$

$$\dot{m}_{café (húmedo)} * [\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f)] = \dot{m}_{café (húmedo)} * \frac{d(\Delta H)}{dt} * \dot{m}_{café (húmedo)}$$

$$\dot{m}_{\text{café (húmedo)}} * [\dot{m}_t (\text{agua a evaporar}) * (100 - H_f)] = [\dot{m}_{\text{café (húmedo)}}]^2 * \frac{d(\Delta H)}{dt}$$

Reemplazando $\dot{m}_{\text{café (húmedo)}}$

$$\dot{m}_{\text{café (húmedo)}} * [\dot{m}_t (\text{agua a evaporar}) * (100 - H_f)] = [\dot{m}_t (\text{agua a evaporar}) + \dot{m}_{\text{café (deshidratado)}}]^2 * \frac{d(\Delta H)}{dt}$$

Con ello, el modelo paramétrico del comportamiento termodinámico del deshidratador se deduce de la siguiente manera:

$$\frac{d(\Delta H)}{dt} = \frac{\dot{m}_t (\text{agua a evaporar}) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t (\text{agua a evaporar}) + \dot{m}_{\text{café (deshidratado)}}]^2} * \dot{m}_{\text{café (húmedo)}}$$

Ecuación 5.5. Balance de masa en el deshidratador.

Conservación de la energía

El cambio de energía dentro de un volumen de control es igual al transporte neto de energía dentro del volumen de control más las interacciones de calor y trabajo de este con sus alrededores (Barbosa et al., 2015).

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{\text{entra}} - \dot{E}_{\text{sale}}$$

Ecuación 5.6. Primera ley de la termodinámica.

Modelo matemático

Con ello, el modelo paramétrico del comportamiento termodinámico del deshidratador se deduce de la siguiente manera:

$$\Delta E = m * Cp * \Delta T$$

Ecuación 5.7. Variación de la energía.

$$\text{Pérdidas} = U * A$$

Ecuación 5.8. Pérdidas de calor en el deshidratador.

Reemplazando 5.7 y 5.8

$$\left[m_{\text{café}} * Cp_{\text{café}} * \frac{d(\Delta T)}{dt} \right] + (\dot{m}_{\text{aire}} * Cp_{\text{aire}} * \Delta T) = \dot{Q}_{\text{cond}} - (\text{Pérdidas} * \Delta T)$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \left(\frac{1}{m_{\text{café}} * Cp_{\text{café}}} * \dot{Q}_{\text{cond}} \right) - \left(\frac{\dot{m}_{\text{aire}} * Cp_{\text{aire}}}{m_{\text{café}} * Cp_{\text{café}}} * \Delta T \right) - \left(\frac{1}{m_{\text{café}} * Cp_{\text{café}}} * U * A * \Delta T \right)$$

Ecuación 5.9. Comportamiento dinámico de un deshidratador de café.

Para la realización del balance de energía del sistema se utilizó el diagrama de la Figura 5.4.

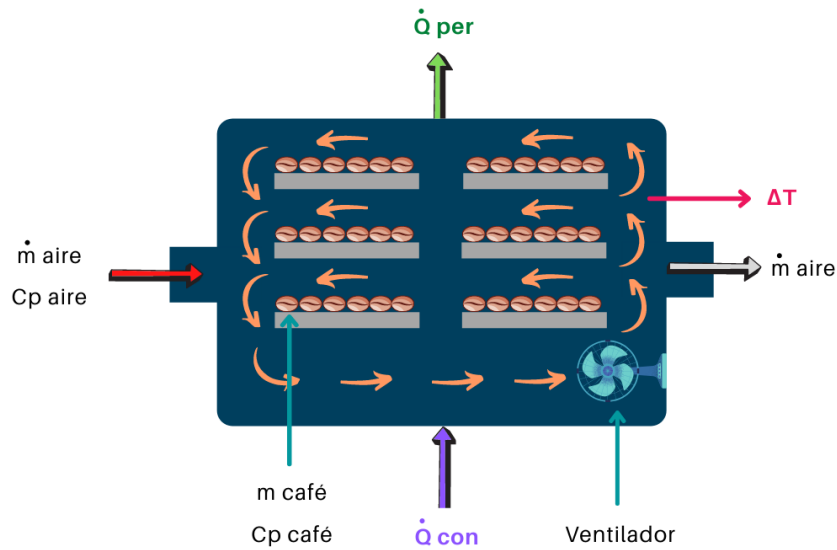


Figura 5.4. Balance de masa y energía del deshidratador solar.

Nota. Elaboración propia.

Modelación en Sistemas Abiertos

Para la modelación, primero se discretizó el modelo matemático y se despejó las variables independientes de temperatura y humedad de modo que cada variable se calcule durante un periodo de tiempo de simulación.

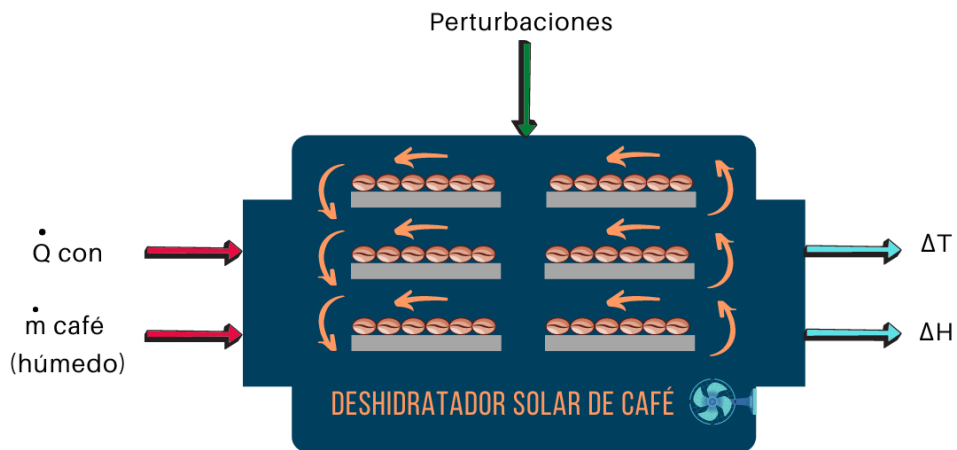


Figura 5.5. Modelo en espacio de estado.

Nota. Elaboración propia.

Balance de masa

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

$$\frac{d(\Delta H)}{dt} = \frac{\dot{m}_t(\text{agua a evaporar}) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t(\text{agua a evaporar}) + \dot{m}_{café(\text{deshidratado})}]^2} * \dot{m}_{café(\text{húmedo})}$$

Balance de energía

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \left(\frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} * \dot{Q}_{cond} \right) - \left(\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} * \Delta T \right) - \left(\frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} * U * A * \Delta T \right)$$

Modelo linealizado

A continuación, el modelo linealizado del sistema de deshidratación de café queda expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} & -\frac{U * A}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & \frac{\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t (agua a evaporar) + \dot{m}_{café} (deshidratado)]^2} \end{bmatrix} \\ * \begin{bmatrix} \dot{Q}_{cond} \\ \dot{m}_{café} (húmedo) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y1 \\ y2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{Q}_{cond} \\ \dot{m}_{café} (húmedo) \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{café} * Cp_{café}} & -\frac{U * A}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{café} * Cp_{café}} & 0 \\ 0 & \frac{\dot{m}_t (agua a evaporar) * (100 - H_f)}{[\dot{m}_t (agua a evaporar) + \dot{m}_{café} (deshidratado)]^2} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Selección del deshidratador de bandejas

Para la selección del deshidratador a utilizar en el modelo matemático del sistema, se realizaron los siguientes cálculos.

Tabla 5.1. Variables de entrada al modelo matemático.

$$m_{total(bh)} = m_{prom(1\ grano)} * H_o = 6,05 * 10^{-5} \text{ kg}$$

Ecuación 5.10. Masa total del café en base húmeda.

$m_{prom(1\ grano)}$: Masa promedio de un grano de café ($1,1 * 10^{-4} \text{ kg}$)

H_o : Porcentaje de humedad inicial (0,55)

$$m_{agua} = m_{prom(1\ grano)} - m_{total(bh)} = 4,95 * 10^{-5} \text{ kg}$$

Ecuación 5.11. Masa de agua evaporable.

$m_{prom(1\ grano)}$: Masa promedio de un grano de café ($1,1 * 10^{-4} \text{ kg}$)

$m_{total(bh)}$: Masa total de café en base húmeda ($6,05 * 10^{-5} \text{ kg}$)

$$H_o(bs) = \frac{m_{total(bh)}}{m_{agua}} = 1,22 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg seca}}$$

Ecuación 5.12. Humedad inicial en base seca.

$m_{total(bh)}$: Masa total del café en base húmeda ($6,05 * 10^{-5} \text{ kg}$)

m_{agua} : Masa de agua a evaporar ($4,95 * 10^{-5} \text{ kg}$)

$$H_f(bh) = \frac{m_{agua} * 100}{100 - H_f} = 5,65 * 10^{-5} \text{ kg}$$

Ecuación 5.13. Humedad en base húmeda respecto a la humedad en base seca.

m_{agua} : Masa de agua a evaporar ($4,95 * 10^{-5} \text{ kg}$)

H_f : Porcentaje de humedad final (12,5%)

$$m_{total(bs)} = H_f(bh) * H_f = 7,06 * 10^{-6} \text{ kg}$$

Ecuación 5.14. Masa total del producto en base seca.

$H_f(bh)$: Humedad en base húmeda respecto a la humedad en base seca ($5,65 * 10^{-5} \text{ kg}$)

H_f : Porcentaje de humedad final (0,125)

$$H_f(bs) = \frac{m_{total(bs)}}{m_{agua}} = 0,143 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg seca}}$$

Ecuación 5.15. Humedad final en base seca.

$m_{total(bs)}$: Masa total del producto en base seca ($7,06 * 10^{-6} \text{ kg}$)

m_{agua} : Masa de agua a evaporar ($4,95 * 10^{-5} \text{ kg}$)

$$m_{\text{agua a evaporar}} = m_{\text{total (bh)}} - m_{\text{total (bs)}} = 5,34 * 10^{-5} \text{ kg}$$

Ecuación 5.16. Masa de agua a evaporar del café.

$m_{\text{total (bh)}}$: Masa total de café en base húmeda ($6,05 * 10^{-5} \text{ kg}$)

$m_{\text{total (bs)}}$: Masa total del producto en base seca ($7,06 * 10^{-6} \text{ kg}$)

$$m_{t \text{ (agua a evaporar)}} = m_{\text{agua a evaporar}} * \frac{m_{\text{café (húmedo)}}}{m_{\text{prom(1 grano)}}} = 7,28 \text{ kg}$$

Ecuación 5.17. Masa total de agua a evaporar.

$m_{\text{agua a evaporar}}$: Masa de agua a evaporar ($5,34 * 10^{-5} \text{ kg}$)

$m_{\text{café (húmedo)}}$: Masa de café a deshidratar (15 kg)

$m_{\text{prom(1 grano)}}$: Masa promedio de un grano de café ($1,1 * 10^{-4} \text{ kg}$)

$$m_{\text{café (deshidratado)}} = m_{\text{café (húmedo)}} - m_{t \text{ (agua a evaporar)}} = 7,72 \text{ kg}$$

Ecuación 5.18. Masa del producto final deshidratado.

$m_{\text{café (húmedo)}}$: Masa de café a deshidratar (15 kg)

$m_{t \text{ (agua a evaporar)}}$: Masa total de agua a evaporar (7,28 kg)

Aproximaciones del grano de café arábigo

Para determinar el área de secado se considera al grano de café como una esfera para evaluar sus propiedades.

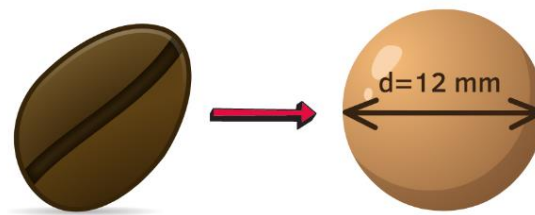


Figura 5.6. Modelo aproximado.

Nota. Elaboración propia.

$$A_s = 4 * \pi * r^2 = 4,52 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Ecuación 5.19. Área superficial de una esfera.

r = Radio de la esfera ($6 * 10^{-3} \text{ m}$)

$$V = \frac{4}{3} * \pi * r^3 = 9,05 * 10^{-7} m^3$$

Ecuación 5.20. Volumen de una esfera.

r = Radio de la esfera ($6 * 10^{-3}m$)

$$A_{(ms)} = A_s * \frac{1 + H_o (bs)}{V * \rho_{café}} = 1,79 \frac{m^2}{kg \text{ seca}}$$

Ecuación 5.21. Área superficial por cada kg de materia seca.

A_s : Área superficial del grano de café ($4,52 * 10^{-4} m^2$)

$H_o (bs)$: Humedad inicial en base seca ($1,22 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ seco}}$)

V : Volumen del grano de café ($9,05 * 10^{-7} m^3$)

$\rho_{café}$: Densidad del café ($620 \frac{kg}{m^3}$)

$$A_{secado} = A_{(ms)} * \frac{m_{café (deshidratado)}}{F_c} = 4,61 m^2$$

Ecuación 5.22. Área de la superficie de secado.

$A_{(ms)}$ = Área superficial por cada kg de materia seca ($1,79 \frac{m^2}{kg \text{ seca}}$)

$m_{café (deshidratado)}$: Masa del producto final deshidratado (7,72 kg)

F_c : Factor de carga (3)

$$N_{bandejas} = \frac{A_{secado}}{A_{bandeja}} = 30,3 \approx 31 \text{ bandejas}$$

Ecuación 5.23. Número de bandejas necesarias para el proceso de deshidratación.

A_{secado} : Área de la superficie de secado ($4,61 m^2$)

$A_{bandeja}$: Área de la bandeja ($0,152 m^2$)

En referencia con los resultados obtenidos en la Tabla 5.2, se seleccionó el siguiente deshidratador de bandejas:

Tabla 5.2. Ficha técnica del deshidratador.

Marca	MAQORITO
Modelo	MQD32BD
Dimensiones del equipo	930 mm (frente) x 550 mm (profundidad) x 795 mm (alto)
Dimensiones de las bandejas	400 x 380 mm
Área de secado	5 m ²
Número de bandejas	32 bandejas de acero inoxidable (calidad 304)
Espacio entre bandejas	3,5 cm
Rango de temperatura	35 – 90°C
Potencia nominal	3000 W
Estructura externa	Acero inoxidable (calidad 201), plancha de 0.8 mm
Energía	220 V
Temporizador	24 horas (ajustable)
Puertas	Abatibles con un visor cada una de vidrio templado
Productos	Ideal para una gran variedad de productos
Adicional	Posee llantas para facilitar su movilización y fijación en punto de operación.



Fuente: (MAQORITO, 2020).

Selección del Panel solar híbrido PVT

Para la selección del panel se consideró el que posee mejores características para la propuesta desarrollada en el proyecto (Abora, 2020).

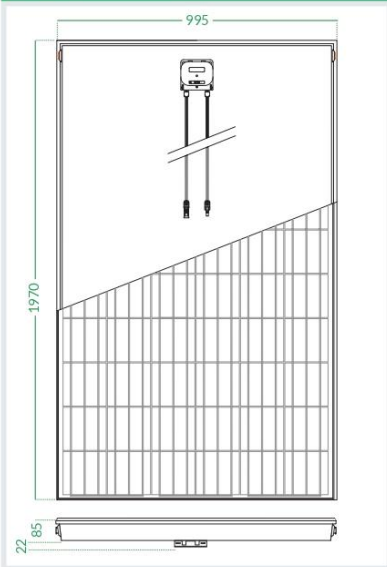


Panel solar híbrido con producción simultánea térmica y fotovoltaica



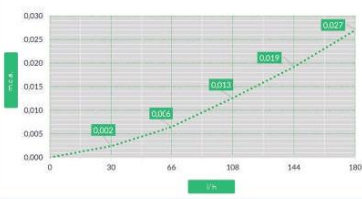
* Todos los porcentajes de producción están condicionados al rango de Tª de trabajo de la instalación.

Dimensiones



Pérdida de carga

Caída de presión: Tª max: 20,13 °C / Tª min: 19,39 °C



Conforme a las Normas de Producto:
IEC 61215 Ed2; IEC 61730-1-2:2004;
EN 12975-1:2006 + A1:2001; EN ISO 9806:2017

Especificaciones Generales

Largo x Ancho x Espesor	1.970 x 995 x (85+22) mm
Area Total	1,96m ²
Area de Apertura	1,88 m ²
Nº células	72
Peso	50 kg.
Vidrio Frontal	3,2 mm.templado
Marco	Aluminio
Protección Caja de Conex.	IP65
Nº Diodos	3 diodos
Dimensiones de célula	156 x 156
Tipo de conexión FV / Longitud cables	Solarlok PV4 / 1m

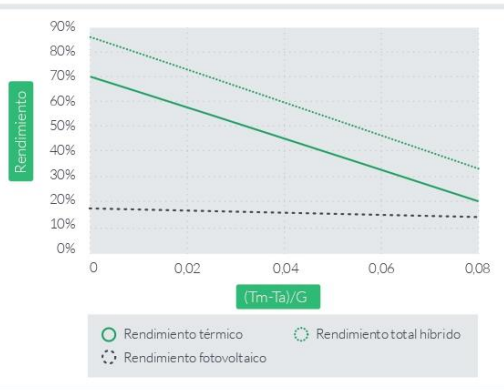
Especificaciones Eléctricas

Condiciones de prueba estándar STC: AM 1.5, Irradiación 1000 W/m², temperatura de la célula 25 °C.

Tipo de célula	Mono-cristalina
Potencia Nominal (W)	350 W
Tensión Máxima Potencia (Vmpp)	39,18 V
Corriente Máxima Potencia (Impp)	8,98 A
Tensión Circuito Abierto (Voc)	48,82 V
Corriente Cortocircuito (Isc)	9,73 A
Eficiencia del módulo (%)	17,8
Tolerancia de Potencia (W)	0/+3%
Tensión Máxima del Sistema	DC 1000 V (IEC)
Backsheet	Negro
Coefficiente de temperatura de Pmpp	-0,41%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0,33%/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	+0,06%/°C
Corriente inversa máxima	15A
Temperatura NOCT*	45+/-2 °C

Especificaciones Térmicas

Rendimiento óptico	0,7
Coef. Pérdidas Térmicas, a1	5,98 W/m ² .K
Coef. Pérdidas Térmicas, a2	0,00 W/m ² .K ²
Volumen líquido interior	1,78 L
Temperatura de estancamiento	126 °C
Num. Conexiones hidráulicas	4 conexiones
Medida Conexión hidráulica	conexión rápido
Presión máxima admisible	10 bar
Caudal nominal	60 L/h



Reservado el derecho de modificaciones técnicas sin previo aviso.
Garantía de 10 años.

MÁS INFORMACIÓN EN
www.abora-solar.com

Referencias bibliográficas:

Abora. (2020). *Ficha Técnica abora aH72 SK*. www.abora-solar.com

MAQORITO. (2020). *Deshidratador 30 A 45 Kg. Horizontal De 2 Ciclos (32 Bandejas)*.
<https://maqorito.com/inicio/537-maqorito-deshidratador-30-a-45-kg-horizontal-de-2-ciclos-32-bandejas.html>

INFORME No. 3

El presente informe se realiza con la finalidad de dar a conocer los resultados numéricos y gráficos de la simulación en Matlab en cumplimiento del objetivo específico 3 para la presentación del Trabajo de integración Curricular, correspondiente a “Optimización energética y exergética de un deshidratador solar de café a partir de un enfoque multidisciplinario”.

Variables de entrada

Se presentan las variables de entrada al modelo matemático con sus valores correspondientes previo al cálculo de la simulación.

Tabla 5.3. Variables de entrada al modelo matemático.

Parámetros	Abreviatura	Descripción	Valores	Unidad
Provincia de Loja	$T_{amb (mín)}$	Temperatura mínima	12,20	[°C]
	$T_{amb (máx)}$	Temperatura máxima	18,90	[°C]
	$E_{solar (Loja)}$	Potencial de radiación solar	5,40	$\left[\frac{kWh}{m^2 \text{ día}}\right]$
	t_{sol}	Horas de sol al día	7,20	[h día]
Panel solar híbrido (aH72)	n	Número de paneles solares utilizados.	3,00	[-]
	A_{panel}	Área total del panel solar	1,96	[m ²]
	T_{panel}	Temperatura del panel solar	20,13	[°C]
	U_{PVT}	Coeficiente global de transferencia de calor del panel solar.	5,98	$\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$
Deshidratador de bandejas (MQD32BD)	$T_{mín}$	Temperatura mínima de secado	40,00	[°C]
	$T_{máx}$	Temperatura máxima de secado	90,00	[°C]
	\dot{m}_{aire}	Flujo de masa de aire	0,01	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
	$C_{p_{aire}}$	Calor específico del aire	1012	$\left[\frac{J}{kg * °C}\right]$
	g	Gravedad	9,81	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
	a	Ancho del deshidratador	0,93	[m]
	b	Largo del deshidratador	0,55	[m]
	c	Alto del deshidratador	0,795	[m]
	$x_{bandeja}$	Ancho de la bandeja	0,40	[m]
$y_{bandeja}$	Largo de la bandeja	0,38	[m]	

	$e_{bandeja}$	Espesor de la bandeja	0,0008	[m]
	k_{acero}	Conductividad térmica del acero inoxidable AISI 302.	15,1	$\left[\frac{W}{m * K}\right]$
	$W_{deshidratador}$	Potencia nominal del deshidratador.	800	[W]
Café arábigo	$m_{producción}$	Producción de café	200	$\left[\frac{arrobas}{año}\right]$
	$t_{disponibilidad}$	Meses de disponibilidad de café (marzo a octubre).	8,00	[meses]
	$t_{producción}$	Días laborables de producción de café.	20	[días]
	$T_{café,máx}$	Temperatura máx. permitida	50,00	[°C]
	$Cp_{café}$	Calor específico del café	4830	$\left[\frac{J}{kg * °C}\right]$
	H_o	Humedad inicial del café	55,00	[%]
	H_f	Humedad final del café	12,50	[%]
	$\rho_{café}$	Densidad del café	620	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
	$k_{café}$	Conductividad térmica	0,61	$\left[\frac{W}{m * K}\right]$
	$m_{grano\ café}$	Masa del grano de café	0,00011	[kg]
	$g_{café}$	Grosor de la capa de café	7,00	[mm]
	$m_{prom\ (1\ grano)}$	Masa de un grano de café	0,11	[g]
	$d_{café}$	Diámetro del café (Aproximación: esfera)	0,012	[m]
Bomba de calor con PVT	T_{con}	Temperatura en el condensador.	50,00	[°C]
	T_{eva}	Temperatura baja en el evaporador.	5,00	[°C]

Nota. Fuente de referencia (Masías, 2019).

Procesos a simular

Se indica de forma gráfica el comportamiento de las variables independientes en función del tiempo. Para ello, se analizarán las siguientes gráficas:

1. Lazo abierto: Calentamiento inicial del deshidratador
2. Lazo retroalimentado: Control analógico de la temperatura (Control PID)

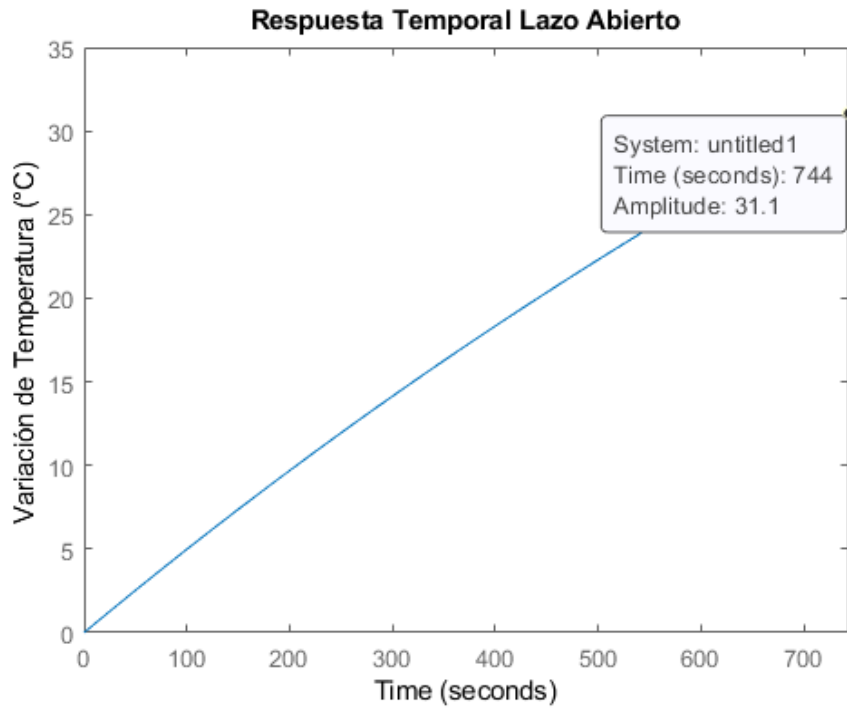
Resultados gráficos

Una vez obtenido el modelo matemático que permite predecir de manera aproximada el comportamiento dinámico de un deshidratador solar de café. Se presentan los resultados obtenidos en el análisis.

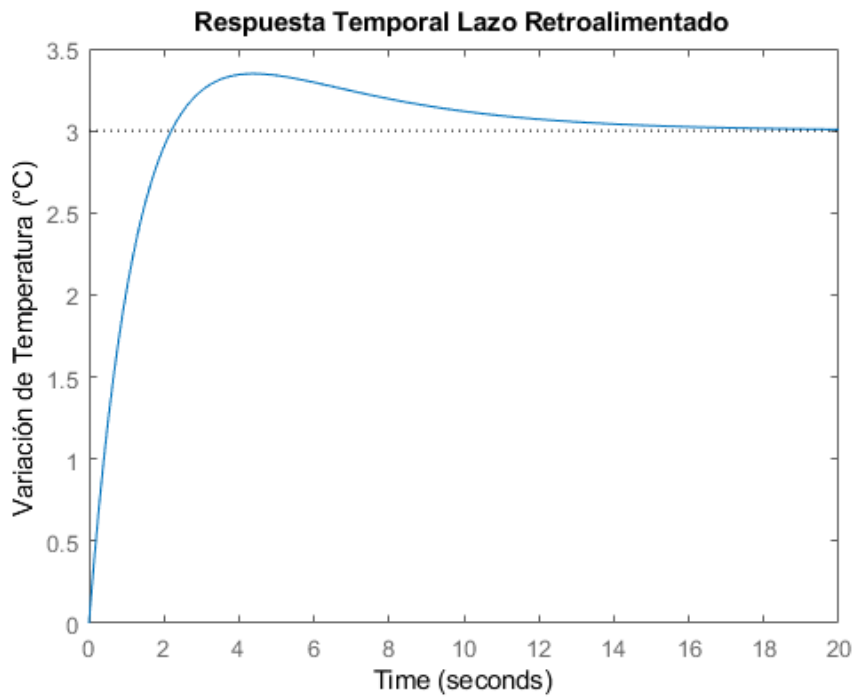
Tabla 5.4. Resultados gráficos de la simulación numérica.

SIMULACIÓN 1

Respuesta Temporal en Lazo abierto

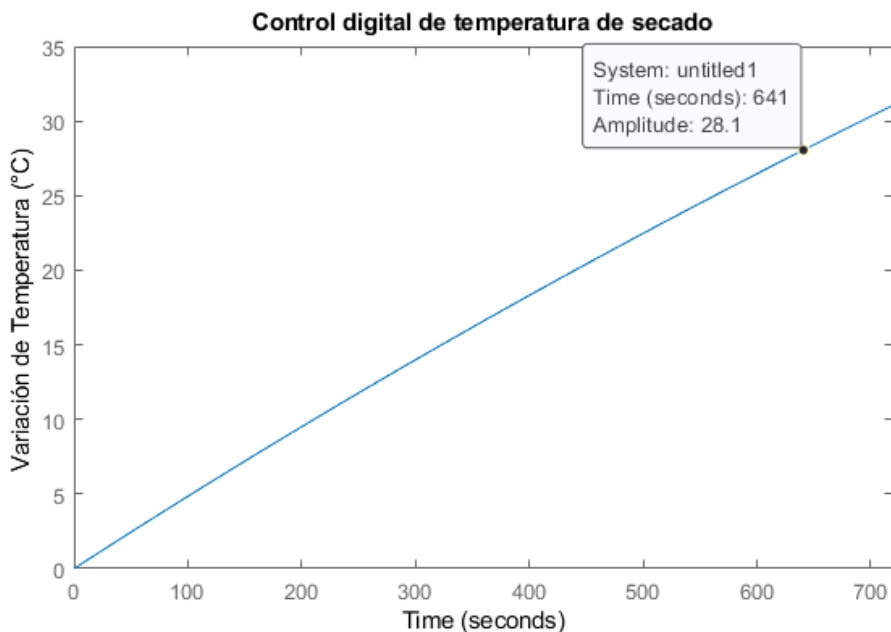


Respuesta Temporal Lazo retroalimentado



Tiempo que se demora en subir la temperatura 3°C

Simulación 1 → $\Delta t = 103$ segundos



Datos ingresados y respuestas obtenidas en Matlab

Tamb =	A_panel =	Tpanel =
18.9000	1.9600	20.1300
E_solar_Loja =	G =	U_pvt =
5400	4410	5.9800
t_sol =	Q_térmica =	mflujo_aire =
7.2000	3087	0.0100
n_pvt =	P_eléctrica =	ancho =
3	784.9800	0.9300

largo =	t_producción_café =	m_agua_1 =
0.5500	20	4.9500e-05
alto =	T_permitida =	Ho_bs =
0.7950	50	1.2222
Ac =	Cp_café =	Hf_bh =
3.3762	4830	5.6571e-05
x_bandeja =	Ho =	mtotal_bs =
0.4000	55	7.0714e-06
y_bandeja =	Hf =	Hf_bs =
0.3800	12.5000	0.1429
e_bandeja =	densidad_café =	m_agua_eva =
8.0000e-04	620	5.3429e-05
k_acero =	k_café =	mtotal_agua_eva =
15.1000	0.6100	7.5893
W_desh =	e_café =	m_café_deshidratado =
800	0.0040	8.0357
m_producción_café =	m_grano_café =	d =
200	1.1000e-04	0.0120
ml_producción_café =	m_café_húmedo =	r =
2500	15.6250	0.0060
t_disp_café =	mtotal_bh =	As =
8	6.0500e-05	4.5239e-04

V =	T_eva =	Q_con_BC_PVT_2 =
9.0478e-07	5	7.7440e+04
Ams =	T_secado =	Q_eva_BC_PVT_2 =
1.7921	50	61740
A_secado =	deltaT =	Ef_PVT =
4.8003	31.1000	0.9059
A_bandeja =	Wpunto_com_BC_PVT =	Ef_PVT_porcentaje =
0.1520	784.9800	90.5858
N_bandeja =	Qpunto_eva_BC_PVT =	Ef_deshidratador_porcentaje =
31.5810	3087	73.2886
P_bandeja =	Qpunto_con_BC_PVT =	COP_BC =
1.5600	3.8720e+03	4.7758
U_desh_interno =	Qpunto_eva_BC =	COP_BC_PVT =
7.9333	3.0206e+03	4.9326
U_paredes =	Wpunto_com_BC =	Incremento_COP =
9.4930	800	3.2837
Pérdidas_PVT =	Qpunto_con_BC =	Tref =
11.7208	3.8206e+03	18.9000
Pérdidas_deshidratador=	Q_con_BC_PVT_1 =	ex_entrada =
33.2560	2.8808e+06	128.0192
T_con =	Q_eva_BC_PVT_1 =	ex_salida =
50	2296728	69.7885

```

ex_pérdida =          exQeva_BC_PVT =
    58.2306          2.3202e+03
                                exQcon_BC_PVT =
                                2.4084e+03

Ef_ex =          exWcom_BC_PVT =
    54.5141          784.9800

```

```

Gc =
      1
Kp + Ki * ---
      s

```

with Kp = 7.41e+04, Ki = 1.46e+04

Continuous-time PI controller in parallel form.

```
info =
```

```
struct with fields:
```

```

      Stable: 1
CrossoverFrequency: 1
      PhaseMargin: 78.8791

```

```
H =
```

```

    0.9812 s + 0.1929
-----
s^2 + 0.9818 s + 0.1929

```

Continuous-time transfer function.



INFORME No. 4

El presente informe se realiza con la finalidad de dar a conocer los resultados del análisis de sensibilidad paramétrica y las gráficas obtenidas de cada variable de interés en función del tiempo en cumplimiento del objetivo específico 4 para la presentación del Trabajo de integración Curricular, correspondiente a “Optimización energética y exergética de un deshidratador solar de café a partir de un enfoque multidisciplinario”.

Variables de entrada

Se presentan los valores correspondientes a la variación de los parámetros previo al análisis de sensibilidad paramétrica.

Tabla 5.5. Valores representados en las gráficas.

Ancho	Pérdidas	Eficiencia energética	Eficiencia exergética	U paredes	Tiempo de calentamiento	Q con
[m]	[W]	[%]	[%]	[W/m ² *°C]	[s]	[kJ]
0.23	14.5586	88.3064	54.5141	8.9424	676	2617.5
0.47	20.9691	83.1574	54.5141	9.2404	696	2694.9
0.93	33.2560	73.2886	54.5141	9.4930	744	2880.8
1.30	43.1388	65.3506	54.5141	9.5924	792	2911.7

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

Tabla 5.6. Valores representados en las gráficas.

E. solar	Qp con	Eficiencia PVT	Eficiencia del deshidratador	COP con PVT	Incremento COP	Tiempo de calentamiento
[Wh/m ² día]	[W]	[%]	[%]	[-]	[%]	[s]
5000	3585.2	89.8326	71.1517	4.9326	9.7087	820
5100	3656.9	90.0320	71.7173	4.9326	8.0286	800
5200	3728.6	90.2237	72.2612	4.9326	6.3993	781
5300	3800.3	90.4081	72.7846	4.9326	4.8184	763
5400	3872.0	90.5858	73.2886	4.9326	3.2837	746
5600	4015.4	90.9220	74.2426	4.9326	0.3454	711
6000	4302.2	91.5272	75.9597	4.9326	-5.0566	655

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

Tabla 5.7. Valores representados en las gráficas.

Pérdidas	Eficiencia energética	Tiempo de calentamiento	Q con	Q eva
[W]	[%]	[s]	[kJ]	[kJ]
10	93.2593	546	2114.1	1685.502
20	86.5185	569	2203.2	1756.503
30	79.7778	592	2292.2	1827.504
40	73.0371	621	2404.5	1917.027

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

Tabla 5.8. Valores representados en las gráficas.

Temperatura de secado	Pérdidas	Eficiencia energética	Eficiencia exergética	U paredes	Tiempo de calentamiento	Q con
[°C]	[W]	[%]	[%]	[W/m2*°C]	[s]	[kJ]
40	30.6196	83.3141	100	8.9359	465	1800.5
45	32.3713	78.1793	71.4156	9.2594	601	2327.1
50	33.2560	73.2886	54.5141	9.4930	744	2880.8
55	33.8983	68.3953	43.5554	9.6672	906	3508.0

Nota. Datos tomados de la simulación en Matlab.

Procesos a simular

Se indica de forma gráfica el comportamiento de las variables independientes en función del tiempo. Para ello, se analizarán las siguientes gráficas:

1. Variación del ancho del deshidratador
2. Variación del potencial de radiación solar
3. Variación de las pérdidas de calor en el deshidratador
4. Variación de la temperatura de secado

Resultados gráficos

Una vez obtenido el modelo matemático que permite predecir de manera aproximada el comportamiento dinámico de un deshidratador solar de café. Se presentan los resultados obtenidos en el análisis al variar cada uno de estos parámetros.

A continuación, se presenta a detalle, el análisis realizado para cada una de estas variables, en donde se indicará:

Tabla 5.9. Valores representados en las gráficas.



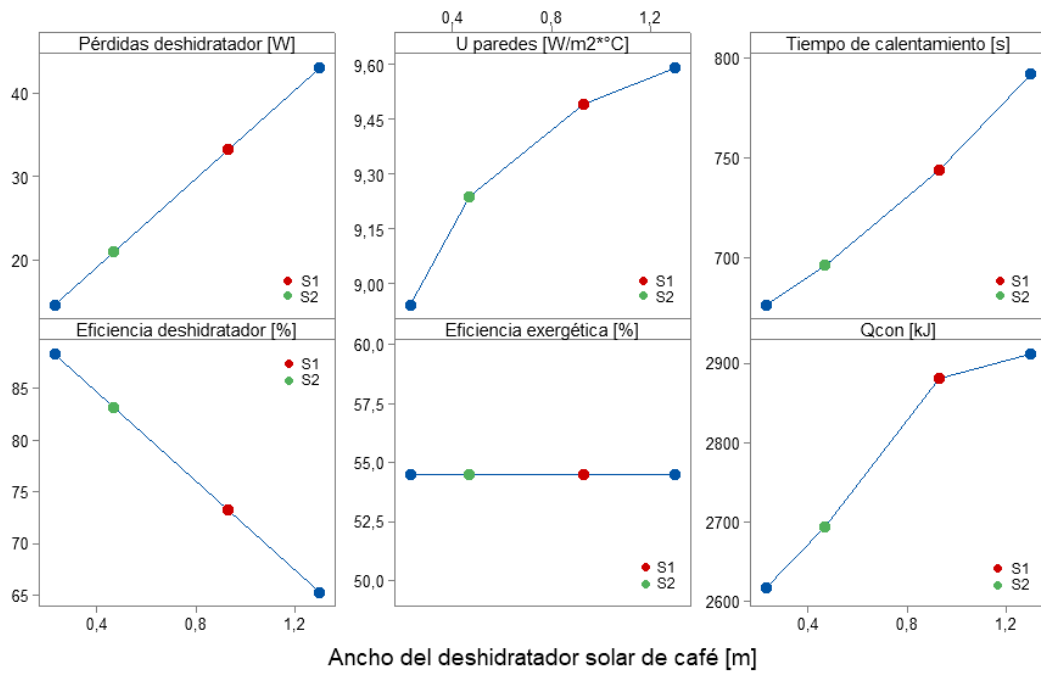
Representación	Simulación	Descripción
	S1	Valores utilizados antes del análisis paramétrico.
	S2	Valores seleccionados para la optimización del sistema.

Tabla 5.10. Resultados gráficos de la simulación numérica.

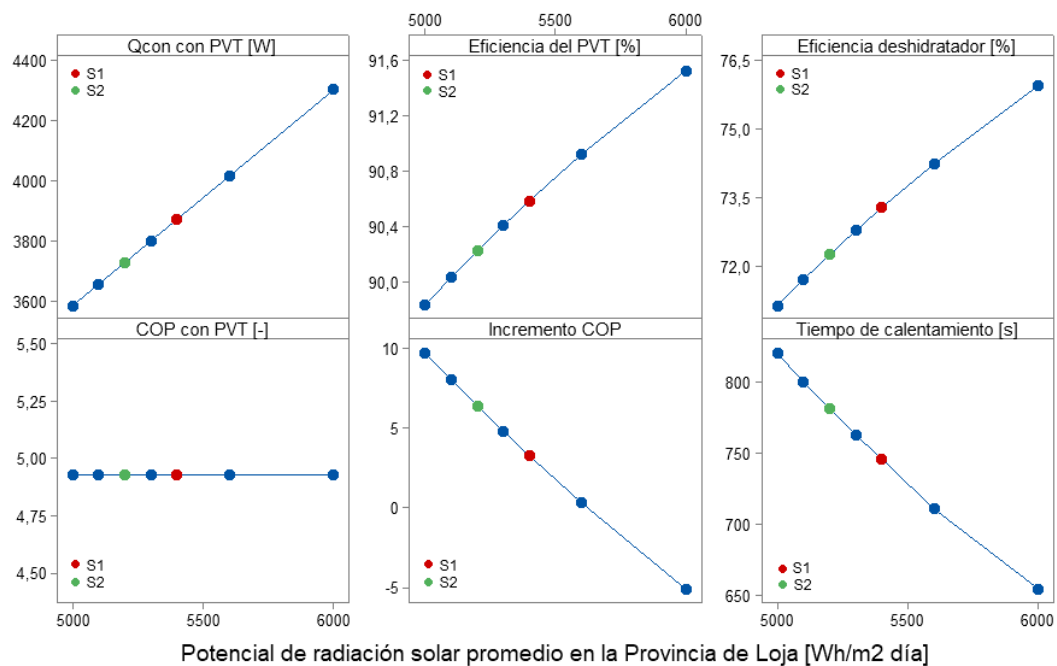
VARIACIÓN DEL ANCHO DEL DESHIDRATADOR DE CAFÉ

Parámetros vs. Ancho del deshidratador



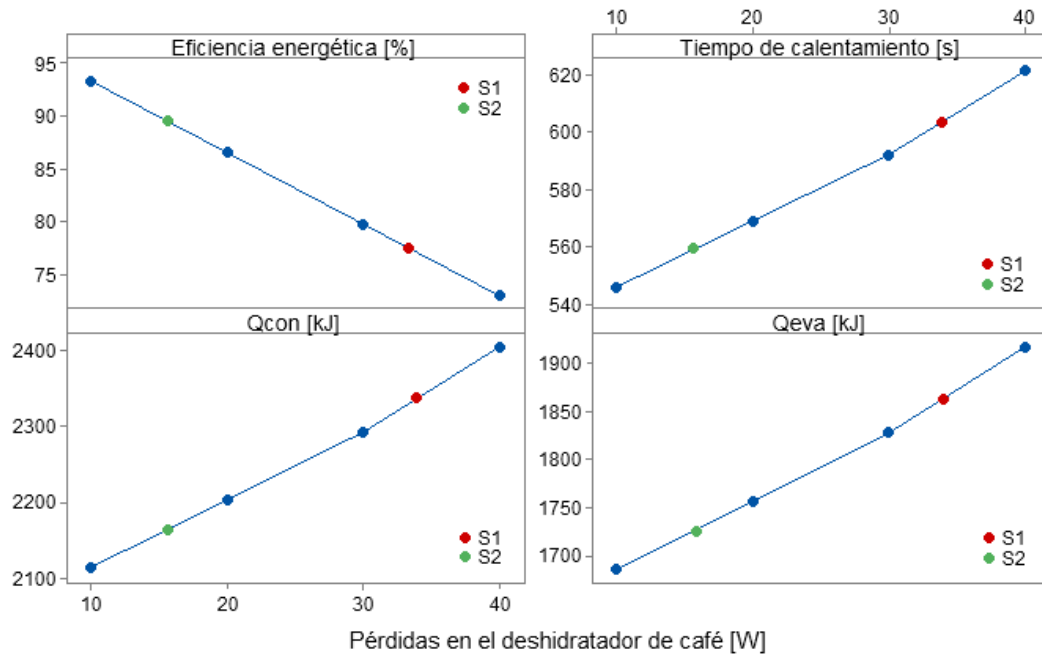
VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR

Parámetros vs. Potencial de radiación solar



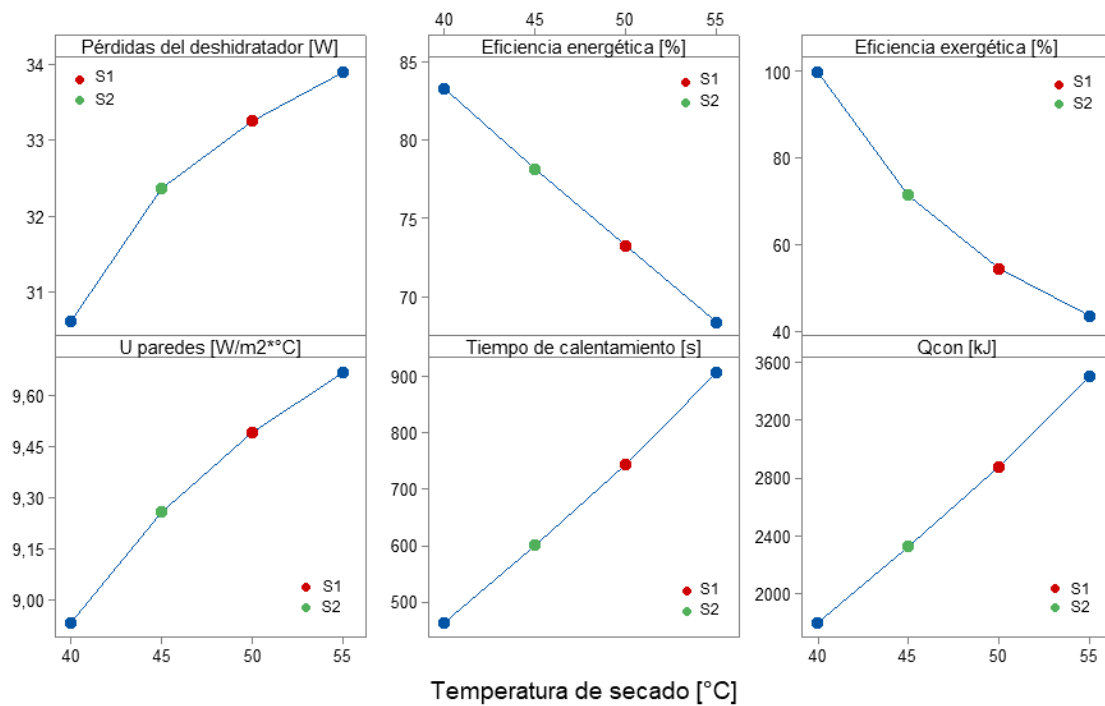
VARIACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN EL DESHIDRATADOR

Parámetros vs. Pérdidas



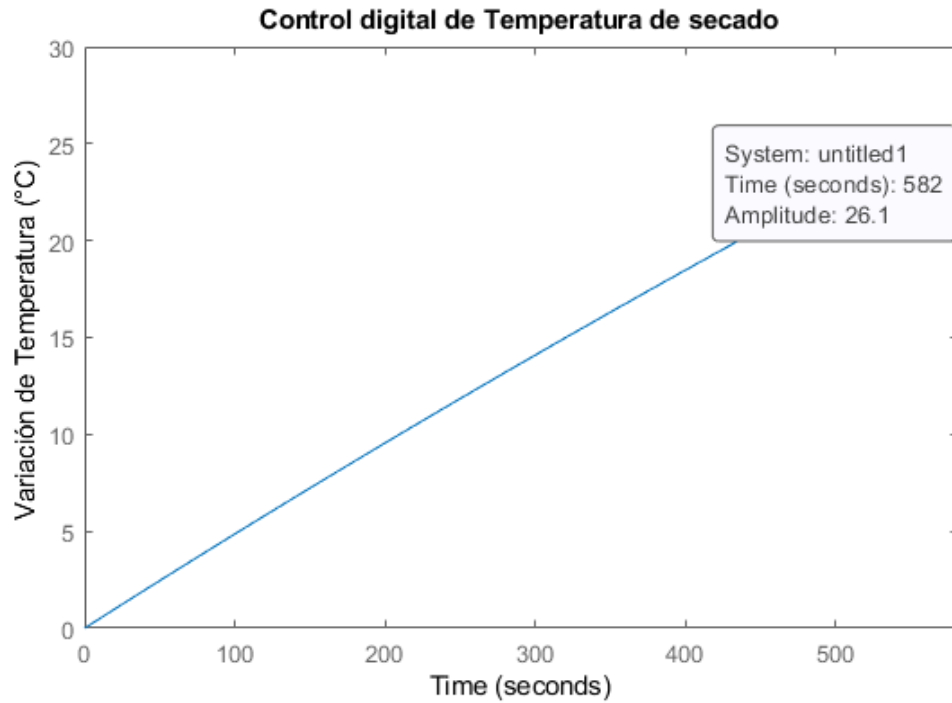
VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SECADO

Parámetros vs. Temperatura de secado

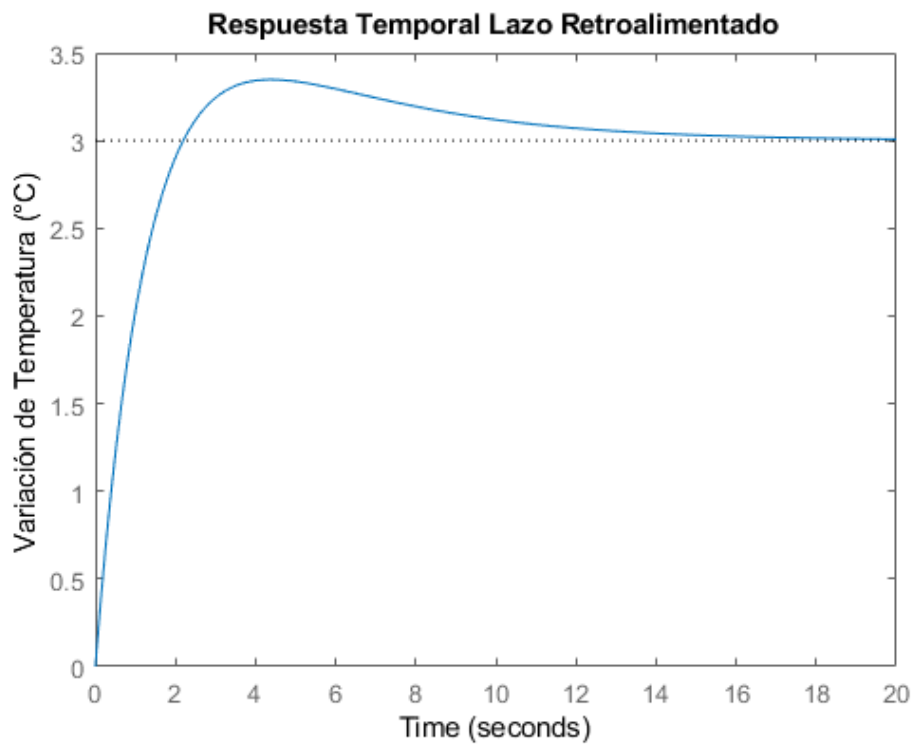


SIMULACIÓN 2

Respuesta Temporal en Lazo abierto

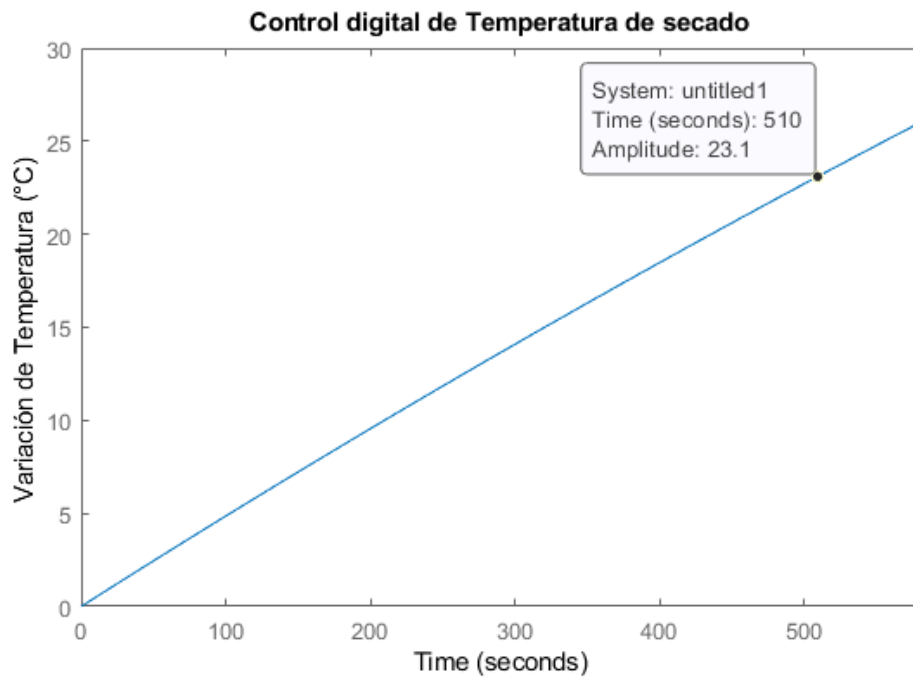


Respuesta Temporal Lazo retroalimentado



Tiempo que se demora en subir la temperatura 3°C

Simulación 2 → $\Delta t = 72$ segundos



Datos ingresados y respuestas obtenidas en Matlab

Tamb =	G =	mflujo_aire =
18.9000	4.2467e+03	0.0100
E_solar_Loja =	Q_térmica =	ancho =
5200	2.9727e+03	0.4200
t_sol =	P_eléctrica =	largo =
7.2000	755.9067	0.5300
n_pvt =	Tpanel =	alto =
3	20.1300	0.7100
A_panel =	U_pvt =	Ac =
1.9600	5.9800	1.7942

x_bandeja =
0.4000

Hf =
12.5000

Q_pérdido_pv_1 =
157.9505

y_bandeja =
0.3800

densidad_café =
620

Q_pérdido_pv_2 =
125.1683

e_bandeja =
8.0000e-04

k_café =
0.6100

Qttotal_pérdido =
423.2720

k_acero =
15.1000

e_café =
0.0040

U_paredes =
7.5856

W_desh =
800

m_café_húmedo =
15.6250

Pérdidas_PVT =
11.7208

m_producción_café =
200

mtotal_agua_eva =
7.5893

Pérdidas_deshidrat =
15.8045

m1_producción_café =
2500

m_café_deshidratado =
8.0357

T_con =
45

t_producción_café =
20

A_secado =
3

T_eva =
5

T_permitida =
50

A_bandeja =
0.1520

T_secado =
45

Cp_café =
4830

N_bandeja =
19.7368

deltaT =
26.1000

Ho =
55

P_bandeja =
1.5600

Wpunto_com_BC_PVT =
755.9067

$Q_{\text{punto_eva_BC_PVT}} = 2.9727e+03$ $Q_{\text{con_BC_PVT_2}} = 7.4571e+04$
 $Q_{\text{punto_con_BC_PVT}} = 3.7286e+03$ $Q_{\text{eva_BC_PVT_2}} = 5.9453e+04$ $T_{\text{ref}} = 18.9000$
 $Q_{\text{punto_eva_BC}} = 2.9087e+03$ $E_{\text{f_PVT}} = 0.9180$ $ex_{\text{entrada}} = 97.7217$
 $W_{\text{punto_com_BC}} = 800$ $E_{\text{f_PVT_porcentaje}} = 91.7954$ $ex_{\text{salida}} = 69.7885$
 $Q_{\text{punto_con_BC}} = 3.7087e+03$ $E_{\text{f_deshidratador}} = 0.8894$ $ex_{\text{pérdida}} = 27.9332$
 $t_{\text{ci}} = 582$ $E_{\text{f_deshidratador_porc}} = 88.9369$ $E_{\text{f_ex}} = 71.4156$
 $Q_{\text{con_BC_PVT_1}} = 2.1700e+06$ $COP_{\text{BC}} = 4.6359$ $exQ_{\text{eva_BC_PVT}} = 2.2343e+03$
 $Q_{\text{eva_BC_PVT_1}} = 1730092$ $COP_{\text{BC_PVT}} = 4.9326$ $exW_{\text{com_BC_PVT}} = 755.9067$
 $t_{\text{cc}} = 20$ $Incremento_{\text{COP}} = 6.3993$ $exQ_{\text{con_BC_PVT}} = 2.1626e+03$

$G_c =$

$$K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

with $K_p = 7.41e+04$, $K_i = 1.46e+04$

Continuous-time PI controller in parallel form.

info =

struct with fields:

Stable: 1
CrossoverFrequency: 1
PhaseMargin: 78.8791

H =

$$\frac{0.9812 s + 0.1929}{s^2 + 0.9816 s + 0.1929}$$

Continuous-time transfer function.