

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO CON ENFOQUE MECATRÓNICO DE UN DESHIDRATADOR HÍBRIDO: SOLAR Y ELÉCTRICO DE PEQUEÑA CAPACIDAD, PARA EL SECADO SUSTENTABLE DE CAFÉ DE BAJA ALTURA**

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

**WILMER DANIEL CUENCA ACARO**  
wilmer.cuenca@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN**  
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

**DMQ, febrero 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, WILMER DANIEL CUENCA ACARO 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.

---

**Wilmer Daniel Cuenca Acaro**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por WILMER DANIEL CUENCA ACARO, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán. PhD**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante 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.

Wilmer Daniel Cuenca Acaro

Ing. Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán. PhD

## **DEDICATORIA**

Para todos mis hermanas y hermanos en especial para Beatriz que me brindó su total apoyo, y para mi querido padre (+) y mi querida madre los cuales siempre se han esforzado enormemente para cumplir las metas de todos sus hijos y vernos llegar lejos.

Wilmer.

## **AGRADECIMIENTO**

A toda mi familia, en especial a mi padre (+) y a mi madre, y a mi hermana Beatriz; los cuales me acompañaron incondicionalmente con toda su sabiduría y apoyo total en cada etapa de este camino, también para todas esas personas que estuvieron ahí presentes a lo largo del transcurso de la carrera, y a mis profesores de la carrera, en especial al Dr. Álvaro Aguinaga quien supo guiarme de la mejor manera para lograr cumplir con esta meta.

Les estaré agradecido toda mi vida.

Wilmer.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
RESUMEN .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco Teórico .....	5
1.4.1 La Caficultura en Ecuador .....	5
1.4.2 Radiación solar en Ecuador.....	6
1.4.3 El secado de café .....	7
1.4.4 Secador solar de café.....	9
1.4.5 Deshidratación.....	10
1.4.6 Propiedades físicas y termodinámicas del grano de café.....	12
1.4.7 Transferencia de calor .....	13
1.4.8 Sistema de almacenamiento térmico.....	14
1.4.9 Resistencia eléctrica.....	14
1.4.10 Aislante térmico .....	16
2 METODOLOGÍA.....	17

2.1	Aspectos fundamentales.....	17
2.2	Diseño de componentes.....	17
2.2.1	Variables de diseño .....	17
2.2.2	Diseño de la cámara.....	18
2.2.3	Diseño del colector .....	26
2.2.4	Diseño de la chimenea .....	32
2.2.5	Selección del ventilador.....	34
2.2.6	Sistema de resistencia eléctrica .....	34
2.2.7	Eficiencia del deshidratador.....	36
2.3	Selección y diseño del módulo de PCM.....	36
2.4	Modelo matemático del deshidratador y simulación en Matlab .....	38
2.4.1	Modelo matemático .....	39
2.4.2	Simulación numérica del modelo matemático .....	40
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
3.1	Resultados .....	41
3.1.1	Dimensionamiento de la cámara. ....	41
3.1.2	Tiempo de secado .....	42
3.1.3	Calor requerido para el secado.....	43
3.1.4	Dimensionamiento del colector solar.....	44
3.1.5	Dimensionamiento de la chimenea.....	45
3.1.6	Selección del ventilador.....	46
3.1.7	Sistema de resistencia eléctrica .....	46
3.1.8	Eficiencia del deshidratador solar .....	47
3.1.9	Dimensionamiento del módulo PCM.....	47
3.1.10	Estabilización de la temperatura durante el secado .....	48
3.2	Conclusiones.....	49
3.3	Recomendaciones.....	49

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXOS .....	54
ANEXO I. Mapa topográfico del noroccidente de Pichincha. ....	54
ANEXO II. Mapa topográfico de la parroquia Pacto. ....	55
ANEXO III. Carga específica recomendada según el tipo de aparato.....	56
ANEXO IV. Mapa solar mensual del Ecuador 2019.....	57
ANEXO V. Propiedades del aire a presión 1 atm.....	58
ANEXO VI. Código Matlab del deshidratador híbrido solar y eléctrico.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Distribución de la radiación solar sobre la superficie. Fuente: (Roa & Ortega, 2011)
- Figura 1.2.** Estructura del fruto del café. Fuente: (Vergara, 2020)
- Figura 1.3.** Secado al sol de café en patio. Fuente: (Levit & Destinations)
- Figura 1.4.** Esquema de un secador mecánico. (Besora, 2017)
- Figura 1.5.** Principales tipos de secadores solares. Fuente: (Mezquitillo, 2014)
- Figura 1.6.** Funcionamiento del secador solar directo. Fuente (Sharma, 2020)
- Figura 1.7.** Funcionamiento del secador solar indirecto. Fuente: (Sharma, 2020)
- Figura 1.8.** Esquema básico de un colector solar de placa plana. Fuente: (Arguello, 2020)
- Figura 1.9.** Esquema circuito equivalente para pared compuesta. Fuente: (Roa & Ortega, 2011)
- Figura 2.1.** Esquema de la pared compuesta de la cámara de secado. Fuente: Autor.
- Figura 2.2.** Representación del proceso termodinámico en el colector solar. Fuente: Autor.
- Figura 2.3.** Circuito térmico del colector solar. Fuente: Autor.
- Figura 2.4.** Coeficientes de pérdidas para cambios de sección de flujo. Fuente: (De la Torre, 2015).
- Figura 2.5.** Diagrama circular de la Ley de Ohm. Fuente: (Cerón & Guerrero, 2015)
- Figura 2.6.** Propiedades de la resistencia eléctrica Nicrome 80. Fuente: (Cerón & Guerrero, 2015)
- Figura 2.7.** Distribución de los módulos de PCM sobre la placa metálica. Fuente: Autor.
- Figura 2.8.** Diseño del módulo de PCM. Fuente: Autor.
- Figura 2.9.** Dimensiones de ubicación del módulo respecto a la placa y entre ellos. Fuente: Autor.
- Figura 3.1.** Relación de la altura del colector y su longitud. Fuente: Autor.
- Figura 3.2.** Ventilador centrífugo. Fuente: (Equipos, 2024)
- Figura 3.4.** Tiempo de estabilización de la temperatura del PCM según la cantidad. Fuente: Autor.

**Figura 3.5.** Tiempo de estabilización de la temperatura de secado, con control PID.  
Fuente: Autor.

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.1.** Valores referenciales para determinar el espesor del aislante. [W/m.K].  
Fuente: (Cuarán & Tinillo, 2013)

**Tabla 2.1.** Propiedades climáticas y geográficas de la parroquia Pacto. Fuente:  
Autor.

**Tabla 2.2.** Propiedades del grano de café. Fuente: Autor.

**Tabla 2.3.** Parámetros de secado. Fuente: Autor.

**Tabla 2.4.** Tabla de propiedades del acero inoxidable AISI 304. Fuente: Autor.

**Tabla 2.5.** Tabla de propiedades y precio de los aislantes térmicos. Fuente  
(Domínguez, 2021)

**Tabla 2.6.** Propiedades del acero A36. Fuente: Autor.

**Tabla 2.7.** Valores de la conductividad térmica de los materiales usados para la  
cámara. Fuente: (Cueva & Chiluisa, 2019)

**Tabla 2.8.** Número de Nusselt para secciones transversales de diferentes formas.  
Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

**Tabla 2.9.** Propiedades de la cera parafínica. Fuente: (Onkar & Vinkel, 2019).

**Tabla 3.1.** Parámetros para el dimensionamiento de las bandejas de secado.  
Fuente: Autor.

**Tabla 3.2** Dimensiones de la bandeja. Fuente: Autor.

**Tabla 3.3.** Parámetros para determinar el espesor de la bandeja. Fuente: Autor.

**Tabla 3.4.** Dimensiones de la cámara interna. Fuente: Autor.

**Tabla 3.5.** Datos del espesor del aislante (lana de vidrio). Fuente: Autor.

**Tabla 3.6.** Dimensiones de las paredes externas de la cámara. Fuente: Autor.

**Tabla 3.7.** Propiedades del aire húmedo obtenidas en el software PsyChart. Fuente:  
Autor.

**Tabla 3.8.** Propiedades del aire a temperatura de secado. Fuente: Autor.

**Tabla 3.9.** Valores de factores y tiempo de secado. Fuente: Autor.

**Tabla 3.10.** Masa seca y masa de agua en cada estado del grano de café. Fuente:  
Autor.

**Tabla 3.11.** Variables implicadas para el cálculo de calor de secado. Fuente: Autor.

**Tabla 3.12.** Iteraciones para determinar la temperatura exterior de la cámara.  
Fuente: Autor.

**Tabla 3.13.** Porcentaje del calor de pérdidas por las paredes de la cámara con y sin aislante. Fuente: Autor.

**Tabla 3.14.** Calor requerido para obtener 1 arroba de café pergamino seco. Fuente: Autor.

**Tabla 3.15.** Variables iniciales para las iteraciones en el modelo matemático. Fuente: Autor.

**Tabla 3.16.** Coeficientes de transferencia de calor, dimensiones y temperaturas del colector. Fuente: Autor.

**Tabla 3.17.** Flujo volumétrico de aire de secado. Fuente: Autor.

**Tabla 3.18.** Variables de cálculo para determinar las caídas de presión. Fuente: Autor.

**Tabla 3.19.** Caídas de presión en todo el secador. Fuente: Autor.

**Tabla 3.20.** Altura de la chimenea y de su cubierta. Fuente: Autor

**Tabla 3.21.** Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo T2. Fuente: (Equipos, 2024)

**Tabla 3.22.** Diámetro y longitud del alambre de Nicrome 80. Fuente: Autor.

**Tabla 3.23.** Eficiencia parcial y total del deshidratador. Fuente: Autor.

**Tabla 3.24.** Dimensiones y cantidad de masa del material PCM en el colector. Fuente: Autor.

**Tabla 3.25.** Calor almacenado en 40 kg de material PCM. Fuente: Autor.

## RESUMEN

La optimización del proceso de deshidratación de café de baja altura, en especial el café arábigo es lo que actualmente se está desarrollando para obtener un café de alta calidad y de menor costo de producción, por lo que la innovación de los métodos de secado y el diseño de nuevos mecanismos que aprovechen de manera eficiente los recursos energéticos disponibles son una prioridad en la actualidad para este campo. El enfoque de este trabajo escrito es el de realizar un diseño de un deshidratador de café donde se aproveche y se combine diversas fuentes de energía renovables y limpias, con una gestión eficiente de las mismas mediante el modelamiento matemático y análisis termodinámico.

Se empieza con la recopilación de información y fundamentos teóricos implicados en la deshidratación del café. En la siguiente etapa se analiza los aspectos fundamentales como requerimientos del secador y consideraciones del proceso de secado. La etapa de diseño de los componentes se realiza con un análisis de parámetros, selección de variables y la elaboración de un modelamiento matemático para la simulación en el software Matlab con el fin de realizar un dimensionamiento y distribución de elementos de manera adecuada. El material de almacenamiento térmico que se propone es la cera parafínica ya que sobre ella se han realizado previos estudios que demuestran su eficiencia para este tipo de aplicaciones. Finalmente, en la siguiente sección se realiza un análisis de los resultados obtenidos para posteriormente emitir las conclusiones y, recomendaciones para un ampliación o desarrollo de este diseño a futuro.

**Palabras clave:** radiación, psicrometría, café, diseño, termodinámica, material PCM, energía solar.

## ABSTRACT

The optimization of the dehydration process of low altitude coffee, especially Arabica coffee, is what is currently being developed to obtain a high quality coffee with lower production costs, so the innovation of drying methods and the design of new mechanisms that efficiently use the available energy resources are currently a priority for this field. The focus of this written work is to design a coffee dehydrator that takes advantage of and combines diverse renewable and clean energy sources, with an efficient management of them through mathematical modeling and thermodynamic analysis.

It begins with the compilation of information and theoretical foundations involved in the dehydration of coffee. In the next stage the fundamental aspects such as dryer requirements and drying process considerations are analyzed. The design stage of the components is carried out with an analysis of parameters, selection of variables and the elaboration of a mathematical modeling for the simulation in the Matlab software in order to carry out an adequate dimensioning and distribution of elements. The thermal storage material proposed is paraffin wax, since previous studies have shown its efficiency for this type of applications. Finally, in the following section, an analysis of the results obtained is made in order to subsequently issue conclusions and recommendations for an extension or development of this design in the future.

**Keywords:** radiation, psychrometry, coffee, design, thermodynamics, PCM material, solar energy.

# 1 INTRODUCCIÓN

El método de secado de café más usado y de manera artesanal es el secado en patios al sol ya que es el más económico y requiere un mínimo de inversión. Este método tiene muchas deficiencias y dependencias tales como no poder controlar si la radiación es muy fuerte o dañina para el grano lo que podría causar resequeidad y cambios en las propiedades organolépticas del café, un secado no parejo u homogéneo debido a una deficiente atención en remover los granos, la invasión de algún tipo de plaga u otros agentes externos y la dependencia de las condiciones del clima; generando así la pérdida de calidad en el grano y aumento en el costo de producción. Por ello se propone el diseño de un deshidratador solar de tipo gabinete y de incidencia de la radiación solar de forma indirecta sobre el grano con ventilación forzada, opción más conveniente porque nos permite superar los problemas mencionados pues este tipo de secado es sustentable y limpio; ya que usa la energía solar como fuente principal, es gratuita, no contaminante, y abundante en todo el callejón interandino del Ecuador, energía que puede ser aprovechada mediante el componente principal del secador que es el colector solar, el cual capta la radiación para calentar el flujo de aire que seca al producto. Los colectores más utilizados y de los que se han realizado muchos estudios son los que usan una o más placas metálicas planas como captador de la radiación llegando a calentarse a temperaturas que sobrepasan los 100 °C, muy por arriba de la temperatura ambiental. Uno de los desafíos más importantes en la actualidad dentro del campo de las energías renovables es aprovechar al máximo dichas energías con el menor desperdicio posible, por lo que en los últimos años se han realizado investigaciones en el campo de la energía solar sobre sistemas que acumulen la energía térmica para que ésta pueda ser usada posteriormente, y se ha descubierto que existen unos tipos de materiales que son capaces de realizar dicho proceso de almacenamiento térmico presentando ventajas notables frente a otros sistemas, por ejemplo que usan agua, se los ha denominado PCM por sus siglas en inglés "Phase Change Materials", lo característico de estos materiales es que cuando llegan a la temperatura de fusión siguen almacenando calor en toda la etapa de cambio de fase es decir el calor latente, luego cuando ya no existe aumento de temperatura el material empieza su proceso de retorno a su estado inicial en el cual entrega al medio externo todo el calor que acumuló. Se ha aplicado este tipo de sistemas con dichos materiales PCM en deshidratadores solares combinándolos además con otras fuentes de energía (eléctrica u otras) que permiten continuar con el secado cuando una de las fuentes no pueda suministrar energía, logrando así mejorar la eficiencia del secador y aumentando la productividad.

## 1.1 Objetivo general

Diseñar, con enfoque mecatrónico, un deshidratador híbrido: solar y eléctrico de pequeña capacidad, para el secado sustentable de café de baja altura.

## 1.2 Objetivos específicos

- 1 Determinar los métodos, procedimientos, tecnologías, características técnicas de los deshidratadores utilizados en las comunidades rurales del Noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito.
- 2 Determinar las especificaciones técnicas y las condiciones de trabajo de la máquina que cubran las necesidades del proceso de secado.
- 3 Establecer las dimensiones, geometrías, y mecanismos, que permitan obtener eficacia y estabilidad en el diseño.
- 4 Determinar el tipo de material de cambio de fase (PCM) que permita seguir con el proceso de secado en las horas de pésimas condiciones de radiación solar.
- 5 Modelar matemáticamente el comportamiento termodinámico y térmico del deshidratador híbrido que permita alcanzar un proceso de secado adecuado.
- 6 Simular numéricamente el modelo en el software Matlab.
- 7 Optimizar el diseño del deshidratador híbrido con base a los análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

## 1.3 Alcance

**Objetivo específico 1 (OE1):** Determinar los métodos, procedimientos, tecnologías, características técnicas de los deshidratadores utilizados en las comunidades rurales del Noroccidente del Distrito Metropolitano de Quito.

- Actividad (A1.1): Recopilación de información sobre la Caficultura en el Ecuador, actividad cafetalera y tecnologías usadas en la actualidad para el secado del café en la zona del noroccidente de Quito, con enfoque en la parroquia rural de Pacto.
- Actividad (A1.2): Revisión bibliográfica sobre la radiación en el Ecuador, niveles de irradiación mensual y anual según la zona; el secado del café, procesos y características del secado, tipos de secadores solares.

- Actividad (A1.3): Selección teórica de conceptos relacionados: deshidratación, propiedades termofísicas del grano de café, transferencia de calor, almacenamiento térmico (materiales PCM).

**Objetivo específico 2 (OE2):** Determinar las especificaciones técnicas y las condiciones de trabajo de la máquina que cubran las necesidades del proceso de secado.

- Actividad (A2.1): Revisión de los requerimientos y características de diseño del deshidratador.
- Actividad (A2.2): Esquematación y descripción de un modelo de proceso de secado.
- Actividad (A2.3): Selección de variables de diseño a partir del análisis de parámetros ambientales, propiedades del grano, carga de trabajo, entre otros.

**Objetivo específico 3 (OE3):** Establecer las dimensiones, geometrías, y mecanismos, que permitan obtener eficacia y estabilidad en el diseño.

- Actividad (A3.1): Determinación de las variables y condiciones del proceso de secado.
- Actividad (A3.2): Dimensionamiento de la cámara de secado, bandeja de secado y otros elementos del deshidratador.
- Actividad (A3.3): Análisis del requerimiento energético para el dimensionamiento del colector solar, la selección del ventilador y la potencia del sistema de resistencia eléctrica.

**Objetivo específico 4 (OE4):** Determinar el tipo de material de cambio de fase (PCM) que permita seguir con el proceso de secado en las horas de pésimas condiciones de radiación solar.

- Actividad (A4.1): Análisis comparativo de las propiedades de materiales PCM disponibles en el mercado.
- Actividad (A4.2): Selección, distribución y adecuación del material PCM dentro del diseño del deshidratador.

**Objetivo específico 5 (OE5):** Modelar matemáticamente el comportamiento termodinámico y térmico del deshidratador híbrido que permita alcanzar un proceso de secado adecuado.

- Actividad (A5.1): Revisión de los modelos matemáticos conocidos que han sido usados en el secado de café.
- Actividad (A5.2): Obtención de las ecuaciones y ajuste del modelo matemático al diseño propuesto del secador.

**Objetivo específico 6 (OE6):** Simular numéricamente el modelo en el software Matlab.

- Actividad (A6.1): Simulación del modelo matemático mediante el software Matlab.
- Actividad (A6.2): Elaboración de gráficas y tablas de datos
- Actividad (A6.3): Optimización del modelo matemático.

**Objetivo específico 7 (OE7):** Optimizar el diseño del deshidratador híbrido con base a los análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

- Actividad (A7.1): Revisión y análisis comparativo de datos obtenidos en la simulación del modelo con registros de datos de proyectos similares.
- Actividad (A7.2): Verificación y optimización del diseño inicial propuesto.

## **1.4 Marco Teórico**

### **1.4.1 La Caficultura en Ecuador**

La producción de café nacional había venido sufriendo un dramático descenso después de las afectaciones del fenómeno del niño en el año 1998 y el aumento de la producción mundial, esto hasta fines de la década pasada cuando en el mercado internacional se hizo tendencia el consumo de café orgánico o también llamado de especialidad, es aquí donde la producción cafetalera volvió a resurgir pero ahora buscando la tecnificación y desarrollo de métodos de secado optimizados que le permitan al agricultor obtener un café de alta calidad con un nivel competitivo a nivel regional y mundial.

#### **1.4.1.1 Variedades de café en Ecuador**

El INEN con su norma 285 clasifica al café en función de la altura de la siguiente manera: café estándar, el que se cultiva en alturas de hasta 800 m.s.n.m.; café de altura, aquel que se siembra en alturas de entre 800 a 1200 m.s.n.m.; café de estricta altura, el que se cultiva en altitudes por arriba de los 1200 m.s.n.m.

- **Café robusta**

Apto para zonas tropicales hasta una altura máxima de sembrío de 1000 m.s.n.m. Crece en temperaturas de entre 18 a 27 °C. Tiene hasta un doble de cafeína que el del tipo arábigo, con un gusto final amargo, de alto volumen, pero bajo aroma; es el más económico y resistente a las plagas. Se lo usa para cafés instantáneos y liofilizados. Las variedades que se cultivan son: ecorobusta, napopayamino y conilón.

- **Café arábigo**

El café tipo arábigo lavado y natural es el que más se emplea en el Ecuador, con un 65% del área total cultivada, para obtener una mejor aroma y sabor se recomienda una altura mínima de 500 m.s.n.m. (Silvestre, 2020). La temperatura media adecuada está entre 16 a 24 grados centígrados. Las variedades del café arábigo de una altura relativa baja son: anacafé 14, batián, bourbon mayaguéz, cuscatleco.

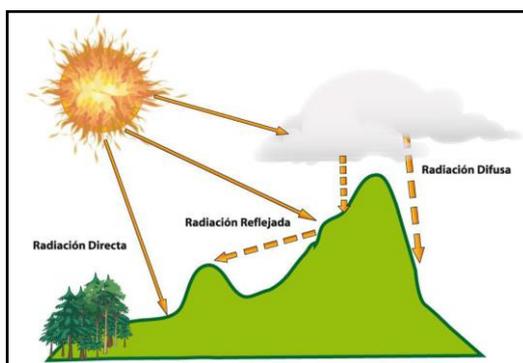
#### **1.4.1.2 El Café en el Noroccidente de Quito**

La geografía del Noroccidente de Quito proporciona condiciones climáticas muy diversas y únicas, que generan microclimas característicos variados, aptos para cultivar todo tipo de variedades de café. Se estima que entre las parroquias de Gualea, Guayabamba, Pacto, San José de Minas, Nanegal y Nanegalito existen unas 400 hectáreas sembradas de café

robusta y arábigo. La parroquia rural Pacto, ubicada a 70 km al noroccidente de Quito, avanza cada año en desarrollo del cultivo de café orgánico, muchos agricultores están implementando nuevas técnicas y mejorando su proceso de post cosecha. Cuenta con altitudes que van desde los 440 m.s.n.m. hasta los 1850 m.s.n.m. El clima en la franja de 500 a 1500 m.s.n.m. es tropical megatérmico muy húmedo, la humedad relativa es superior al 80%. La temperatura promedio anual es superior a los 25 °C, con una máxima y mínima absolutas de 39 y 13 °C respectivamente, siendo abril y mayo los meses más cálidos. La insolación anual puede variar de entre 600 a 1400 horas. (Pacto, 2021)

#### 1.4.2 Radiación solar en Ecuador

La radiación solar se denomina al grupo de ondas electromagnéticas que emite el sol y que llegan a la tierra, distribuyéndose desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. La radiación directa como su nombre lo indica es aquella que toca a la superficie terrestre sin atravesar ningún tipo de obstáculo, posteriormente puede ser reflejada por la superficie hacia la atmósfera. Lo opuesto a la radiación directa es la difusa la cual si atraviesa perturbaciones. (Roa & Ortega, 2011)



**Figura 1.1.** Distribución de la radiación solar sobre la superficie. Fuente: (Roa & Ortega, 2011)

El país al estar ubicado sobre el ecuador goza de un nivel fuerte y estable de radiación solar, aunque esta intensidad puede variar según el clima, la latitud y altitud geográfica, el valor mínimo recomendado es de 3,8 kWh/m<sup>2</sup>.día, aunque en provincias como Pichincha e Imbabura se tienen mayores valores que van desde los 4,5 kWh/m<sup>2</sup>.día (Vaca & Ordoñez, 2020). La heliofanía expresa la duración de la radiación solar directa por día o año sobre una determinada zona y se expresa en horas. En toda la zona costera hasta una altura de 500 m se tiene un anual de horas solares de entre 600 a 1700 h, alcanzando el máximo valor en climas secos. En la región interandina la radiación solar directa registra un valor anual entre 1200 a 2000 h, exceptuando a las zonas de altas precipitaciones; mientras que en la Amazonía las horas solares están entre 1000 a 1400 h al año. En las islas Galápagos la insolación registra un valor anual promedio de 2000 h.

### 1.4.3 El secado de café

Para comprender el proceso del secado del café se debe conocer cómo está conformado el grano. Está compuesto por varios elementos que se van perdiendo en cada estado del cerezo y durante el proceso de secado.

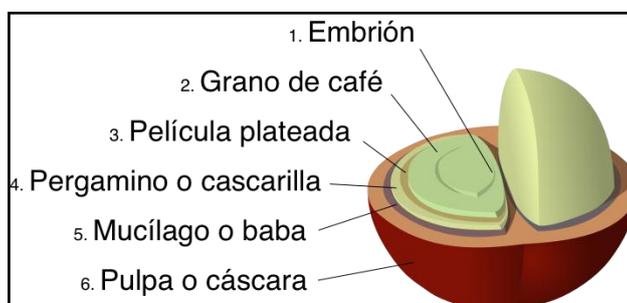


Figura 1.2. Estructura del fruto del café. Fuente: (Vergara, 2020)

#### 1.4.3.1 Beneficiado del café

Luego de haber sido cosechado y seleccionado, el café pasa a la siguiente etapa muy importante porque determina su calidad y particular aroma, conocida como el beneficiado del grano, este puede ser por vía húmeda o por vía seca.

**Beneficiado por la vía húmeda:** Este método tiene la finalidad de obtener un café despulpado donde existen algunas variantes en las cuales se deja el mucílago y otra ya sólo el pergamino. Sus etapas son: despulpado, fermentado, lavado, escurrido y secado. Aquí la humedad del grano está entre un 65-55% b.h. Recomendado para el café arábigo ya que permite obtener cafés “suaves”, de mejor calidad por ende de mejor aroma y sabor.

**Beneficiado por la vía seca:** Es un método más sencillo pues simplemente se seca el grano entero sin ser lavado ni descascarado, generalmente se lo seca directo al sol en capas de hasta 5 cm de espesor, moviéndolas unas 3 veces al día. Con este método se obtienen los cafés “naturales”, “fuertes”, método apto para el café robusta, por lo que su producción es más económica.

#### 1.4.3.2 Fases del secado del grano

Este proceso es el más importante y complejo ya que fija la calidad, aroma, textura, entre otras características. El secado general de café se divide en tres fases: oreado, la humedad pasa del 65% de humedad al 50%; presecado, evaporación del agua desligada del grano, reduciendo la humedad al 35-30% (humedad crítica); secado, eliminación del agua ligada al grano, llegando a un valor de humedad de entre el 9-12% (humedad de equilibrio).

### 1.4.3.3 Métodos de secado de grano

**Secado en patios (natural)**: Este método se recomienda para producciones menores a 500 arrobas anuales. Se esparce el grano en patios de cemento, que tiene un cierto grado de inclinación (aprox. 1 grado) para el desagüe. Con un rastrillo se esparcen los granos hasta formar una capa inicial de un espesor de 3 cm, según vaya secándose el grano se puede aumentar el espesor final a un máximo de 10 cm. Luego de manera periódica, cada 5 a 6 horas se mueve y se vuelve a esparcir para obtener un secado uniforme de los granos. El secado solar dura entre 7 a 15 días dependiendo de las condiciones climáticas. (Besora, 2017)



Figura 1.3. Secado al sol de café en patio. Fuente: (Levit & Destinations)

**Secado mecánico (artificial)**: Consiste en usar una fuente externa para aumentar la temperatura del aire a no más de 60 °C para luego ser impulsado por un ventilador al interior de la cámara de secado la cual se encuentran esparcidos los granos a una altura de capa de 30 a 50 cm. (CENICAFE, 2012)

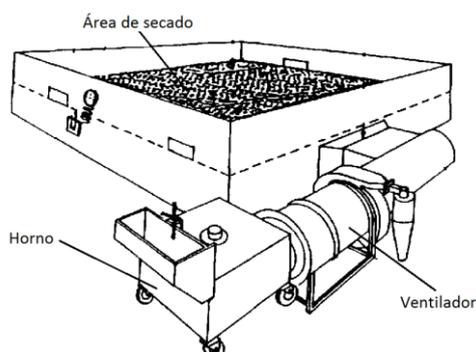


Figura 1.4. Esquema de un secador mecánico. (Besora, 2017)

Las fuentes de calentamiento de aire pueden ser: quemadores de combustible de carbón mineral, ACPM, GLP (no se recomienda usar aceite quemado); resistencias eléctricas, bomba de calor. Los equipos de secado mecánico más comunes son: secado estático sin cámara de presecado, silo-secador (de torre), secador de dos pisos, rotativo tipo guardiola.

#### 1.4.4 Secador solar de café

Un secador solar usa como fuente de energía la radiación solar, aunque existen variantes al modelo en donde se puede combinar con otras fuentes de energía. Sus componentes principales son: área de entrada de aire, es la zona por donde ingresa el aire del ambiente para luego ser calentado; colector solar, el cual capta la radiación y la transforma en calor que se aplica sobre el aire para calentarlo; cámara de secado, es el componente en el que ocurre el proceso de deshidratación, aquí se encuentra esparcido el café en las bandejas que pueden tener forma rectangular o cuadrada, pueden ser perforadas y tener una profundidad entre 10 a 100 mm, se recomienda que se fabriquen de metal para una mayor conductividad del calor y que la temperatura inicial del producto esté dentro de 15 a 20 °C; área de salida o chimenea, es el lugar por donde sale el aire luego del secado. (Ruiz, 2016)

##### 1.4.4.1 Tipos de deshidratadores solares

Los deshidratadores solares pueden ser clasificados, según el contacto o incidencia de la radiación con el grano y según el tipo de circulación de aire que utiliza.

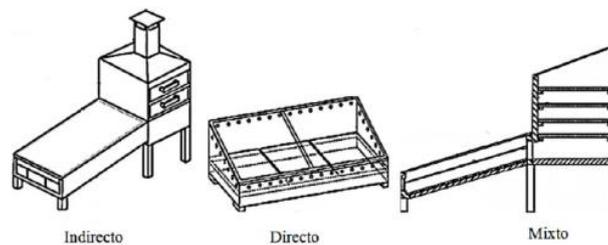


Figura 1.5. Principales tipos de secadores solares. Fuente: (Mezquitillo, 2014)

**Secador solar directo (SSD):** Su principal característica es que el colector y la cámara de secado conforman el mismo elemento, los granos están expuestos a la radiación ya que sobre su techo se ubica una cubierta transparente, generalmente son más compactos.

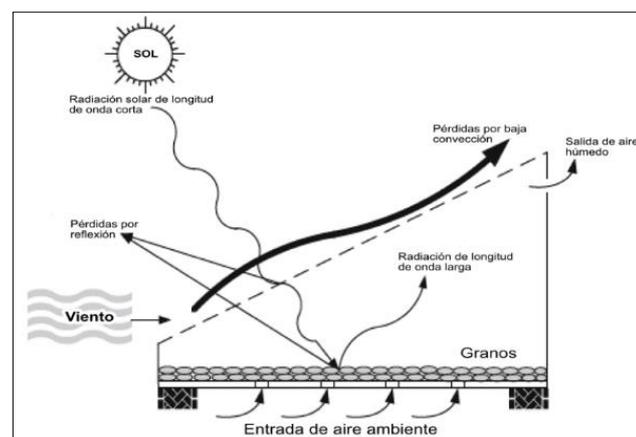


Figura 1.6. Funcionamiento del secador solar directo. Fuente (Sharma, 2020)

**Secador solar indirecto (SSI):** A diferencia del SSD, en este modelo el grano no recibe la radiación solar ya que se encuentra aislado del exterior, dentro de la cámara de secado, el colector es el que capta la radiación, con este secador se obtiene un café de más calidad.

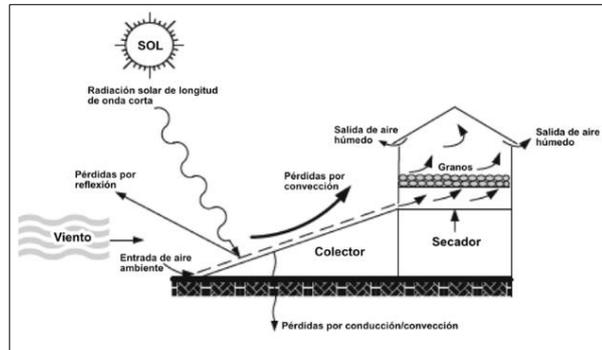


Figura 1.7. Funcionamiento del secador solar indirecto. Fuente: (Sharma, 2020)

#### 1.4.4.2 Colector solar

La superficie de captación es la encargada de convertir la radiación solar incidente en calor útil para el calentamiento del aire. El rango de operación va de 40°C hasta los 130°C (Roa & Ortega, 2011). Para un adecuado funcionamiento se lo debe posicionar según en el hemisferio donde se trabaje, si es en el hemisferio sur se lo sitúa en dirección al norte y viceversa para el caso de estar en el hemisferio norte (Marchena & Vicente, 2020). Para nuestro país un ángulo de inclinación recomendado es de 10° para estos sistemas de captación solar y para paneles fotovoltaicos (Giler & Romano, 2017). En la figura 1.8 se puede observar los componentes fundamentales de un colector solar.

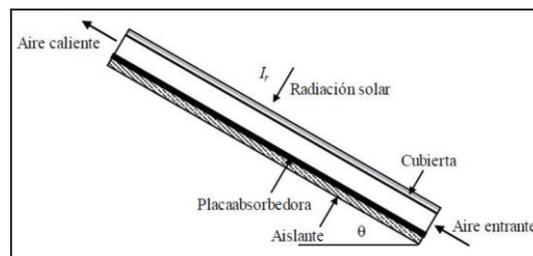


Figura 1.8. Esquema básico de un colector solar de placa plana. Fuente: (Arguello, 2020)

#### 1.4.5 Deshidratación

##### 1.4.5.1 Propiedades del aire

- Humedad absoluta ( $\omega_a$ )

$$\omega_a = \frac{m_v}{V_{ah}} = \frac{\text{masa de vapor } H_2O \text{ [kg]}}{\text{volumen de aire húmedo [m}^3\text{]}}$$

Ecuación 1.1

- Humedad específica ( $\omega_s$ )

$$\omega_s = \frac{m_v}{m_{ah}} = \frac{\text{masa de vapor } H_2O \text{ [kg]}}{\text{masa de aire húmedo [kg]}}$$

Ecuación 1.2

- Razón o mezcla de humedad ( $M_h$ )

$$M_h = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\text{masa de vapor [kg]}}{\text{masa de aire seco [kg]}}$$

Ecuación 1.3

- Densidad del aire ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

Ecuación 1.4

Donde,  $P$ : presión según la altitud (Pa),  $T$ : temperatura (K),  $M$ : masa molar del aire (0,02897 kg/mol),  $R$ : constante universal de los gases (8,31 J/mol.K).

#### 1.4.5.2 Deshidratación en los sólidos

La masa total  $m_h$  de un material sólido está conformada por una parte seca ( $m_s$ ) y por una parte minoritaria de agua ( $m_{H_2O}$ ) (Cerrón & Junchaya, 2019).

$$m_h = m_s + m_{H_2O}$$

Ecuación 1.5

- Humedad (base húmeda)

Es el porcentaje que se obtiene relacionando la masa de agua contenida ( $m_{H_2O}$ ) en el sólido y su masa total ( $m_t$ ).

$$\%W_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} * 100$$

Ecuación 1.6

- Humedad (base seca)

Es la relación porcentual entre la masa de agua contenida en el material y su masa seca ( $m_s$ ). Existen algunas ecuaciones que permiten obtener esta variable.

$$\%W_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} * 100$$

Ecuación 1.7

$$\%W_{bs} = \frac{100 \cdot W_{bh}}{100 - W_{bh}}$$

Ecuación 1.8

$$m_{H_2O} = \frac{W_{bh} \cdot m_s}{1 - W_{bh}}$$

Ecuación 1.9

### 1.4.6 Propiedades físicas y termodinámicas del grano de café

- Calor latente de vaporización

$$h_{fg} = (2502.4 - 2.4295\theta) \cdot (1 + 1.44408e^{-21.5011X})$$

Ecuación 1.10

Donde,  $h_{fg}$ : calor latente de vaporización c.p.s. (kJ/kg),  $\theta$ : temperatura del grano (°C),  $X$ : humedad en el café (decimal, base seca).

- Calor específico

$$CS = 1,3556 + 5,7859M$$

Ecuación 1.11

Donde,  $CS$ : calor específico del grano de café (kJ/kg·K),  $M$ : humedad del grano (decimal, base seca)

- Densidad aparente

$$\rho_{ap} = 365,884 + 270,67M$$

Ecuación 1.12

Donde,  $\rho_{ap}$ : densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>),  $M$ : contenido de humedad (decimal, base seca)

- Diámetro equivalente

Es el diámetro del volumen de un grano considerándolo como una esfera. Donde  $V_c$  volumen unitario del grano de café (0,13 cm<sup>3</sup>).

$$d_{eq} = \left( \frac{6 \cdot V_{grano}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 1.13

- Número total de granos

Para un volumen determinado de café, se puede conocer la cantidad de granos (Vera & Yugsi, 2015) utilizando el grupo de ecuaciones 1.14.

$$\begin{array}{cccc} V_{sc} = \frac{m_c}{\rho_a}; & V_{uc} = \frac{\pi \cdot (D_e)^3}{6}; & V_{tc} = V_{sc} \cdot (1 - \varepsilon) & N_c = \frac{V_{tc}}{V_{uc}} \\ \text{(a)} & \text{(b)} & \text{(c)} & \text{(d)} \end{array}$$

Ecuación 1.14

Donde,  $V_{sc}$ : volumen sólo de café ( $m^3$ ),  $V_{uc}$ : volumen unitario de café ( $m^3$ ),  $V_{tc}$ : volumen total de café ( $m^3$ ),  $\varepsilon$ : porosidad del lecho,  $D_e$ : diámetro equivalente (m),  $N_c$ : número total de granos de café.

## 1.4.7 Transferencia de calor

### 1.4.7.1 Conducción

La ley de Fourier describe cómo fluye el calor a través de una pared.

$$q_x = \dot{q}_x \cdot A = \frac{k \cdot A}{L} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Ecuación 1.15

Donde,  $k$ : conductividad térmica del material ( $W/m.K$ ),  $L$ : longitud (m),  $A$ : área de la pared perpendicular al flujo ( $m^2$ ),  $T_{s1,s2}$ : temperatura inicial y final respectivamente (K),  $U$ : coeficiente global de transferencia de calor ( $W/m^2.K$ ),  $\Delta T$ : variación total de temperatura (K)

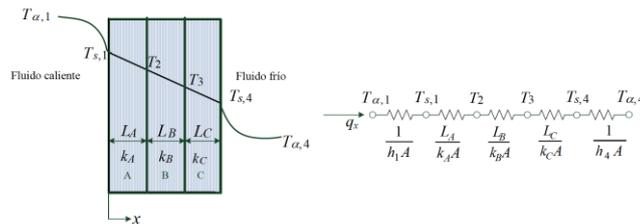


Figura 1.9. Esquema circuito equivalente para pared compuesta. Fuente: (Roa & Ortega, 2011)

$$U = \frac{1}{A \cdot R_{tot}} = \frac{1}{(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4)}$$

Ecuación 1.16

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{U \cdot A}$$

Ecuación 1.17

### 1.4.7.2 Convección

La ecuación 1.19 describe la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{q}_x = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$

Ecuación 1.18

Donde,  $h$ : coeficiente de convección ( $W/m^2.K$ ),  $A$ : área de contacto con el fluido ( $m^2$ ),  $T_s$ : temperatura superficial (K),  $T_{\infty}$ : temperatura ambiente (K).

### 1.4.7.3 Radiación

El valor del nivel de emisión de radiación de cuerpo a una determinada temperatura se puede calcular con la ley de Stefan Boltzman, sólo una superficie ideal es la que emite la máxima radiación y se la conoce como cuerpo negro.

$$\dot{Q}_{emi} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4$$

Ecuación 1.19

Donde,  $\sigma$ : constante de Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $A_s$ : área de la superficie emisora de radiación ( $\text{m}^2$ ),  $T_s$ : temperatura superficial (K),  $\varepsilon$ : emisividad del material (entre 0 y 1), para un cuerpo negro  $\varepsilon = 1$ .

### 1.4.8 Sistema de almacenamiento térmico

Reservar la energía térmica en un sistema físico es algo que se está estudiando y los materiales PCM están demostrando que sirven para ese propósito al almacenar el calor cuando sube su temperatura (calor sensible) y el calor en su cambio de fase (calor latente), para luego entregar dicho calor cuando su temperatura desciende. (Méndez, 2019)

**PCM Orgánico**: El material PCM orgánico más popular que se usa generalmente son las parafinas: hidrocarburos parafínicos, aleaciones moleculares y ceras parafínicas. Tienen mayor capacidad de acumulación el calor que el agua (hasta 5 veces más) para bajas variaciones de temperatura, y una aceptable variación volumétrica de un 10% durante el cambio de fase. El aspecto más importante de un PCM es la facilidad de absorber y entregar el calor latente dentro del intervalo de temperatura de trabajo. (Mayayo, 2012)

**PCM Inorgánico**: El material PCM inorgánico más estudiado es la sal de Gauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ya que presenta propiedades termodinámicas y físicas interesantes que amplían su aplicación en diferentes campos, y son mucho más baratas que los PCM orgánicos. Presentan un inconveniente de segregación de fases y uno de subenfriamiento, pero ya han sido solucionados mediante el uso de agentes nucleantes. (Mayayo, 2012)

### 1.4.9 Resistencia eléctrica

**Ley de Ohm**: Relaciona el voltaje, la intensidad de corriente y la resistencia en un circuito eléctrico, como se señala en la ecuación 1.20.

$$V = I * R$$

Ecuación 1.20

**Resistencia eléctrica a la temperatura de operación:** Es la oposición que presenta un material al paso de corriente a través de él y varía con su temperatura.

$$R_{Tabm} = \frac{R_T}{F}$$

Ecuación 1.21

Donde:  $R_{Tabm}$ : resistencia del material a temperatura ambiente (Ohmios);  $R_T$ : resistencia del material a temperatura de trabajo (Ohmios);  $F$ : factor de resistencia-temperatura.

**Superficie radiante de la resistencia:** Es el área de la resistencia expuesta y en contacto con el aire. Para un alambre de sección circular se determina con la ecuación 1.22.

$$A_r = \pi * d * l$$

Ecuación 1.22

Donde:  $A_r$ : área radiante (m<sup>2</sup>);  $d$ : diámetro del alambre (m);  $l$ : longitud del alambre (m<sup>2</sup>).

**Carga específica de la resistencia:** Es un parámetro importante, en casos que la transferencia del calor no se dé rápidamente puede generarse un sobrecalentamiento en la resistencia, por lo que se recomienda seleccionar materiales con un valor relativamente bajo.

$$p = \frac{P}{A_r}$$

Ecuación 1.23

Donde:  $p$ : carga específica de la resistencia (W/cm<sup>2</sup>);  $P$ : potencia disipada (W).

**Potencia disipada de la resistencia:** Es la relación entre la resistencia y la potencia que puede presentar un material, se determina con la ecuación 1.22.

$$P = I^2 * R = \frac{V^2}{R}$$

Ecuación 1.24

La longitud y el diámetro del alambre se pueden calcular realizando una sustitución en las ecuaciones anteriores. Donde:  $\rho$ : resistividad eléctrica (Ω.cm).

$$d = 0,74 * \sqrt[3]{\left(\frac{P}{V}\right)^2 * \frac{F * \rho}{p}}$$

Ecuación 1.25

$$l = \frac{P}{\pi * d * \rho}$$

Ecuación 1.26

### 1.4.10 Aislante térmico

Para considerar a un material como aislante térmico el valor de su conductividad térmica debe ser menor a 0,050 W/m.K, y el valor de su resistencia deberá ser mayor a 0,25 m<sup>2</sup>.K/W (Palomo, 2017). El espesor del aislante térmico se determina con la ecuación 1.27 basándose en la tabla referencial 1.1. (Cuarán & Tinillo, 2013)

$$e = e_{ref} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{ref}}$$

Ecuación 1.27

Donde,  $\lambda$ : conductividad térmica del aislante (W/m.K),  $\lambda_{ref}$ : conductividad térmica referencial [W/m.K],  $e_{ref}$ : espesor referencial (mm).

**Tabla 1.1.** Valores referenciales para determinar el espesor del aislante. [W/m.K]. Fuente: (Cuarán & Tinillo, 2013)

ESPESOR DE CONDUCTOS Y ACCESORIOS		ESPESOR DE APARATOS Y DEPÓSITOS	
Aire	Espesor (mm)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Espesor (mm)
Caliente	20	≤ 2	30
Frío	30	> 2	50

## **2 METODOLOGÍA**

El diseño del secador híbrido empieza con los aspectos fundamentales, estableciendo las características y aspectos esenciales que se pretenden tener en el secador. A continuación, las variables de diseño, se tabula los datos de las condiciones ambientales y se determinan las condiciones del grano. La fase de diseño es la más importante ya que en esta se realiza el dimensionamiento, selección de materiales y cálculos termodinámicos de los principales componentes y sistemas en general. Luego la selección del material PCM se realiza con base a un análisis de sus propiedades que permita almacenar la mayor cantidad de energía térmica. Finalmente se realiza el modelo matemático para ejecutar la simulación numérica en el software Matlab. Los resultados obtenidos se verifican y se analiza, se realiza una optimización de las variables en caso de ser necesario.

### **2.1 Aspectos fundamentales**

El deshidratador debe cumplir con las siguientes características: soportar la humedad y temperatura de trabajo, resistente y durable a las condiciones de operación y externas, liviano para una cómoda movilidad, y de fácil manejo y mantenimiento.

El diseño de este secador solar se basa en los siguientes aspectos:

- Características del producto: Se debe establecer las características iniciales y finales del grano de café, las cuales están determinadas por sus propiedades físicas y bioquímicas.
- Variables de operación: Definen las condiciones del lugar y variables fundamentales que se desean controlar durante el proceso de deshidratación.
- Dimensiones del secador: Establece la capacidad energética necesaria junto con la cantidad de producto que se desea secar.

### **2.2 Diseño de componentes**

#### **2.2.1 Variables de diseño**

##### **2.2.1.1 Condiciones ambientales**

Pacto es una parroquia rural ubicada al noroccidente del D.Q.M. que cuenta con altitudes donde se puede cultivar café de baja altura.

**Tabla 2.1.** Propiedades climáticas y geográficas de la parroquia Pacto. Fuente: Autor.

Propiedad	Valor
Altitud (m)	800
Temperatura promedio (°C)	21
Humedad relativa (%)	85
Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1,09
Presión absoluta (kPa)	92,08
Calor específico del aire (J/kg·K)	1008

### 2.2.1.2 Condiciones del grano

Se utilizará café con beneficiado húmedo (lavado y escurrido, humedad al 55 % b.h.). Las propiedades para se calculan utilizando las ecuaciones de la sección 1.4.6.

**Tabla 2.2.** Propiedades del grano de café. Fuente: Autor.

Propiedad	Café pergamino húmedo	Café pergamino seco
Humedad (% b.h.)	55	12
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	696,64	402,80
Diámetro equivalente (mm)	6,4	5,4
Calor específico del grano (kJ/kg·K)	8,43	2,14
Masa total del grano (g)	0,43	0,22
Porosidad	0,51	0,43

### 2.2.2 Diseño de la cámara

Se toman las siguientes consideraciones importantes para un adecuado dimensionamiento de la cámara de secado.

- La temperatura interna de la cámara se considera uniforme e igual a la temperatura del aire a la salida del colector (50 °C).
- Se toma un valor constante del coeficiente de transferencia de calor y que es uniforme en todo el contorno de la cámara.
- Capacidad por ciclo para obtener 1 arroba de café pergamino seco (12% b.h.).
- Al inicio del proceso se introduce café pergamino húmedo (55% b.h.)

**Tabla 2.3.** Parámetros de secado. Fuente: Autor.

Parámetro	Valor
Temperatura del aire de secado (°C)	50
Velocidad del aire de secado (m/s)	2
Humedad inicial del café (% b.h.)	55
Humedad crítica del café (% b.h.)	35
Humedad final del café (% b.h.)	12

### 2.2.2.1 Bandejas de secado

Para realizar el dimensionamiento de las bandejas o charolas de secado se calcula la masa de café pergamino húmedo  $m_{cph}$  con la ecuación 2.1 (Espinoza & Menjívar, 2018). El espesor recomendado de la capa de café es 22 mm (CENICAFE, 2012). La FAO recomienda medidas máximas para bandejas de secado con cargas entre 20-35 kg, de un largo de 1,5 m y un ancho de 1 m (De la Torre, 2015). Por lo que se opta por un largo de 1,2 m y un ancho de 0,60 m. Con esto se distribuye equitativamente la masa total para dos bandejas propuestas, se comprueba que la densidad de carga  $D_{carga}$  esté dentro del rango de 5 a 18 kg/m<sup>2</sup> (Forson & Nazha, 2007). Los pretilos de la bandeja tendrán 30 mm para evitar que los granos se rieguen.

$$m_{cph} = 1,93 \cdot m_{cps}$$

Ecuación 2.1

- **Material para la bandeja**

Para la industria de alimentos el material idóneo es el acero inoxidable 304 que es el más usado comercialmente, ya que no hay actividad química al contacto con el producto, no produce olores ni sabores, y es resistente a la corrosión y de fácil desinfección.

**Tabla 2.4.** Tabla de propiedades del acero inoxidable AISI 304. Fuente: Autor.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción (MPa)	490
Esfuerzo a la fluencia (MPa)	310
Módulo de elasticidad (GPa)	200
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7800

- **Espesor de la bandeja**

Se calcula a partir de la ecuación 2.2, del esfuerzo de diseño, tomando un factor de seguridad de 1,5. (Ruiz, 2016). Por recomendaciones de buenas prácticas de diseño se aumenta 1 mm al espesor (Ruiz, 2016). Además, se considera que el área perforada de la bandeja debe ser al menos el 20% de la superficie total (Espinoza & Menjívar, 2018), y las mismas tendrán forma circular con un diámetro de agujero de 3 mm. (Calle & Aparicio, 2011).

$$S_d = \frac{P_{carga} * (a)^2}{(t_m)^2}$$

Ecuación 2.2

$$P_{carga} = D_{carga} * g$$

Ecuación 2.3

Donde,  $S_d$ : esfuerzo de diseño ( $N/m^2$ ),  $a$ : ancho de la charola (m),  $t_m$ : espesor de la charola (m),  $P_{carga}$ : carga que soporta la bandeja ( $N/m^2$ ),  $g$ : gravedad ( $m/s^2$ ).

$$S_d = \frac{S_f}{FS}$$

Ecuación 2.4

Donde,  $S_f$ : Esfuerzo de fluencia,  $FS$ : Factor de seguridad, 1,5.

### 2.2.2.2 Cámara de secado

#### Paredes internas

Se propone agregar a la dimensión del largo de la cámara un cinco por ciento de la dimensión del largo de la bandeja por razones de movilidad.

$$L_{cam} = 1,05 * l_{bandeja}$$

Ecuación 2.5

Para evitar fugas de circulación por el fondo y frente de la bandeja se propone una dimensión de ancho igual a la de la bandeja. Para la altura interna de la cámara las bandejas se separan 15 cm entre sí, y 15 cm del techo de la cámara de secado ya que se trata de un flujo perpendicular. (K.S. & Mutai, 2014)

- **Material**

El material será el mismo que el de las bandejas ya que estará trabajando en el mismo medio, pero no soportará cargas, entonces el espesor será de  $E_{pi} = 1$  mm. (Ruiz, 2016)

## Aislante térmico

Con el fin de reducir las fugas de calor hacia el exterior, se coloca alrededor de la cámara de secado un material de aislamiento térmico. Un material altamente recomendado es la lana de vidrio por su disponibilidad, bajo precio y gran eficiencia.

**Tabla 2.5.** Tabla de propiedades y precio de los aislantes térmicos. Fuente (Domínguez, 2021)

Material	Conductividad térmica $\lambda$ (W/m.K)	Espesor nominal (mm)	Resistencia a la tracción (kPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Lana de vidrio	0,035	40-160	20	20

Para este proyecto se usan los valores referenciales de la tabla 1.1 para calcular el espesor del aislante. Para componentes instalados en el exterior y trabajo con fluidos calientes se aumenta un valor de 10 mm al espesor calculado. (Cuarán & Tinillo, 2013)

## Paredes externas

El acero negro (ASTM A36) es el más usado en este tipo aplicaciones, se propone un espesor de  $E_{pe} = 2$  mm ya que estará expuesto hacia las condiciones ambientales y fuerzas externas.

**Tabla 2.6.** Propiedades del acero A36. Fuente: Autor.

Propiedad	Valor
Esfuerzo a fluencia (MPa)	250 (espesor $\leq$ 200mm)
Módulo de elasticidad (GPa)	200
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850

Se calcula las dimensiones de las paredes externas considerando el espesor del aislante.

$$H_{ecam} = H_{cam} + 2 * e_{ais}$$

Ecuación 2.6

$$L_{ecam} = L_{cam} + 2 * e_{ais}$$

Ecuación 2.7

$$A_{ecam} = A_{cam} + 2 * e_{ais}$$

Ecuación 2.8

### 2.2.2.3 Tiempo de secado

El tiempo que se requiere para llegar a la humedad final en el grano es necesario determinarlo para que podamos realizar un estudio de la energía total que requiere el proceso. Calculamos cada componente de la ecuación 2.9 correspondiente al tiempo total de secado.

$$t_s = \frac{m_{cps}}{A_{ts} \cdot R_c} (X_i - X_c + X_c \cdot \ln \frac{X_c}{X_f})$$

Ecuación 2.9

Donde,  $t_s$ : tiempo de secado (s),  $m_{cps}$ : masa de café pergamino seco (kg),  $X_i$ : humedad inicial del grano (decimal, base húmeda),  $X_c$ : humedad crítica del grano (decimal, base húmeda),  $A_{ts}$ : área total de secado ( $m^2$ ),  $R_c$ : velocidad de secado ( $kg/m^2 \cdot s$ ).

### Propiedades del aire húmedo

La temperatura del aire a la salida de la cámara se puede calcular con la ecuación 2.10 (Abubakar & Umaru, 2018). Los demás valores se determinan con el software psicrométrico PsyChart versión 2.01.

$$T_f = T_a + 0,25(T_e - T_a)$$

Ecuación 2.10

Donde,  $T_f$ : temperatura a la salida de la cámara ( $^{\circ}C$ ),  $T_a$ : temperatura ambiental ( $^{\circ}C$ ),  $T_e$ : temperatura a la entrada de la cámara ( $^{\circ}C$ ).

### Factores de cálculo

Un valor recomendado para la velocidad del aire al interior del secador es de 1,5 (m/s) (Vera & Yugsi, 2015). El área total del café se calcula utilizando el conjunto de ecuaciones 1.14. Con ayuda de las tablas de termodinámica para el aire se calculan los valores de las propiedades del aire para la temperatura de secado (Cengel Y. , 2012). Los números adimensionales como el Reynolds y el Nusselt se determinan con las ecuaciones 2.11 y 2.12. El coeficiente de transferencia de calor se halla con la ecuación 2.13.

$$Re = \frac{D_e \cdot v_{ais}}{\mu_{aire}}$$

Ecuación 2.11

$$Nu = 1,17 * Re^{0,585} * Pr^{0,33}$$

Ecuación 2.12

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{D_e}$$

Ecuación 2.13

Establecidas estas variables se puede determinar la velocidad constante de secado con la ecuación 2.14, que relaciona la entalpía de vaporización  $h_{fg}$  y la temperatura de secado.

$$R_c = \frac{h_c}{h_{fg}} \cdot (T_{secbs} - T_{secbh})$$

Ecuación 2.14

#### **2.2.2.4 Calor requerido para el secado**

Se debe considerar todos los calores que intervienen en el sistema, así como también las pérdidas, con lo que se establece la ecuación 2.15.

$$Q_{sec} = Q_{cafe} + Q_{scam} + Q_{sH2O} + Q_{vapor} + Q_{perd} + Q_{cam} + Q_{res}$$

Ecuación 2.15

#### **Calor requerido para calentar el café**

La cantidad de agua se obtiene calculando la masa de vapor de agua y la masa seca para cada estado de grano (pergamino húmedo y seco), luego mediante diferencia de masas, obtendremos la cantidad neta de humedad a quitar.

$$Q_{cafe} = m_{sc} * CS * (T_2 - T_1)$$

Ecuación 2.16

Donde,  $m_{sc}$ : masa seca de café, CS: calor específico del café,  $T_2$ : temperatura de secado,  $T_1$ : temperatura ambiente.

#### **Calor sensible de las paredes internas y bandejas**

$$Q_{scam} = m_{paredes\ internas + bandejas} * Cp_{304} * (T_2 - T_1)$$

Ecuación 2.17

Donde,  $Cp_{304}$ : calor específico del acero inoxidable, 0,5 (kJ/kg.K)

#### **Calor sensible del agua**

$$Q_{sH2O} = m_{H2O} * Cp_{304} * (T_2 - T_1)$$

Ecuación 2.18

Donde,  $Cp_{H2O}$ : calor específico del vapor de agua (kJ/kg.K)

#### **Calor latente de vaporización del agua**

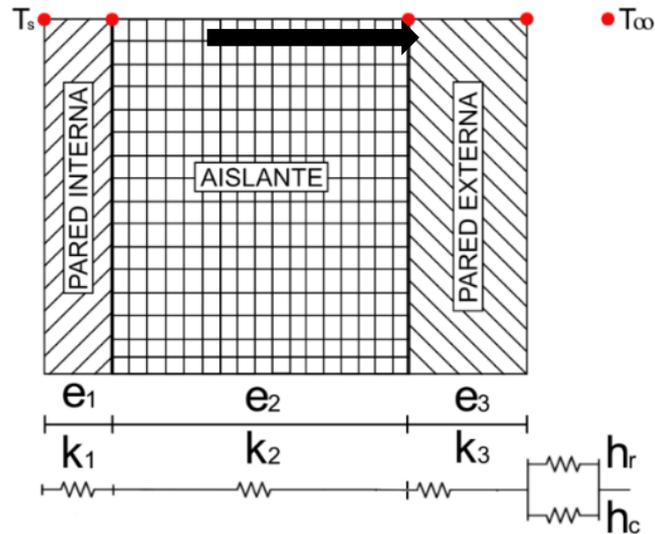
$$Q_{vapor} = m_{H2O} * h_{fg}$$

Ecuación 2.19

Donde,  $h_v$ : calor latente de vaporización (kJ/kg)

## Calor perdido a través de las paredes de la cámara

Las paredes de la cámara están conformadas por una pared compuesta de tres capas: pared interna, aislante, pared externa; como se puede ver en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Esquema de la pared compuesta de la cámara de secado. Fuente: Autor.

$$q_{perd} = A_{Tcs} * \left( \frac{T_{si} - T_{\infty}}{\frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{h_r + h_c}} \right)$$

Ecuación 2.20

Donde,  $A_{Tcs}$ : área total de la cámara ( $m^2$ ),  $T_{si}$ : temperatura de la pared interna (K),  $T_{\infty}$ : temperatura ambiente (K),  $e_{1,2,3}$ : espesor de las placas metálicas y el aislante (m),  $k_{1,2,3}$ : coeficiente de conducción térmica de cada placa y aislante (W/m.K),  $h_{r,c}$ : coeficiente de radiación y convección del aire exterior ( $W/m^2.K$ ).

## Área total de la cámara de secado

$$A_{Tcs} = 2 * [(H_{cam} * A_{cam}) + (H_{cam} * L_{cam}) + (A_{cam} * L_{cam})]$$

Ecuación 2.21

## Coficiente de convección del aire en el exterior

La ecuación 2.22 (Watmuff) permite calcular de manera aproximada este coeficiente, relacionando la velocidad del viento  $\vartheta$  del lugar (2 m/s) (Sánchez & Yuquilema, 2020).

$$h_c = 2,8 + 3 * \vartheta$$

Ecuación 2.22

### Coeficiente de radiación

Para calcular este coeficiente se requiere conocer el valor de la temperatura exterior de la cámara, mediante un proceso de iteraciones y asumiendo un valor inicial 5 grados mayor a la temperatura ambiente se calcula este coeficiente con las ecuaciones del coeficiente de radiación  $h_r$ .

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_{se} + T_{\infty})(T_{se}^2 + T_{\infty}^2)$$

Ecuación 2.23

Donde,  $\varepsilon$ : emisividad para paredes metálicas, 0,85 (Sánchez & Yuquilema, 2020),  $\sigma$ : coeficiente de Boltzman,  $5,67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>),  $T_{se}$ : temperatura superficial externa de la cámara de secado (K).

$$T_{se} = T_{si} - \left( \frac{q_{perd}}{A_{TCS}} * \left( \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} \right) \right)$$

Ecuación 2.24

**Tabla 2.7.** Valores de la conductividad térmica de los materiales usados para la cámara. Fuente: (Cueva & Chiluisa, 2019)

Material	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)
Acero inoxidable AISI 304, $e_1$	0,0015	16,3
Lana de vidrio, $e_2$	0,040	0,035
Acero negro A36, $e_3$	0,002	58,7

Para verificar que el espesor del aislamiento es el adecuado se verifica que el valor del calor de pérdidas con aislamiento debe ser menor al 10% del valor de calor de pérdidas sin aislamiento.

### Calor residual

Es aquel calor del agua que no se evapora del grano durante el secado  $m_{H_2O f}$ . Se determina con la ecuación 2.25.

$$Q_{res} = m_{H_2O f} * C_{pH_2O} * (T_2 - T_1)$$

Ecuación 2.25

### 2.2.3 Diseño del colector

El colector solar que se propone para este diseño es el del tipo de placa plana de captación de radiación con una distribución de módulos de material PCM sobre dicha placa. Para su diseño se establecen las siguientes consideraciones:

- El colector usa sólo una placa plana.
- La temperatura del aire a la salida del colector debe ser 50°C.
- La temperatura del aire a la entrada del colector es la misma que la del ambiente.
- La temperatura media del aire al interior del colector tiene un valor igual al promedio entre la temperatura ambiente aire y la temperatura de secado.
- La temperatura de la cubierta transparente es igual al promedio entre la temperatura interna media del colector y la temperatura ambiente.

#### 2.2.3.1 Flujo másico de aire

Este parámetro es fundamental para realizar el modelado y dimensionamiento correcto del colector solar. Se calcula con la ecuación 2.26 que relaciona el calor necesario de secado, el calor específico del aire y la variación de temperatura.

$$\dot{m}_{ais} = \frac{Q_{seca}}{t_s * C_{p_{aire}} * (T_{secado} - T_{ambiente})}$$

Ecuación 2.26

#### 2.2.3.2 Modelo matemático del colector solar y simulación en Matlab

El análisis termodinámico permite realizar variaciones de parámetros y un adecuado dimensionamiento del colector solar, para ello se considera lo siguiente:

- El colector opera en estado estable con flujo de calor unidireccional y sus componentes no sufren variaciones en sus propiedades termofísicas.
- Se desprecia pérdidas de calor laterales y el valor la resistencia por conducción de la cubierta es insignificante.
- La cubierta absorbe radiación de un valor despreciable.
- El conjunto placa absorbente y módulos de PCM son los que captan la energía solar incidente.

En la figura 2.2 se muestra el volumen de control que se aplica al aire y al conjunto placa-módulo PCM.

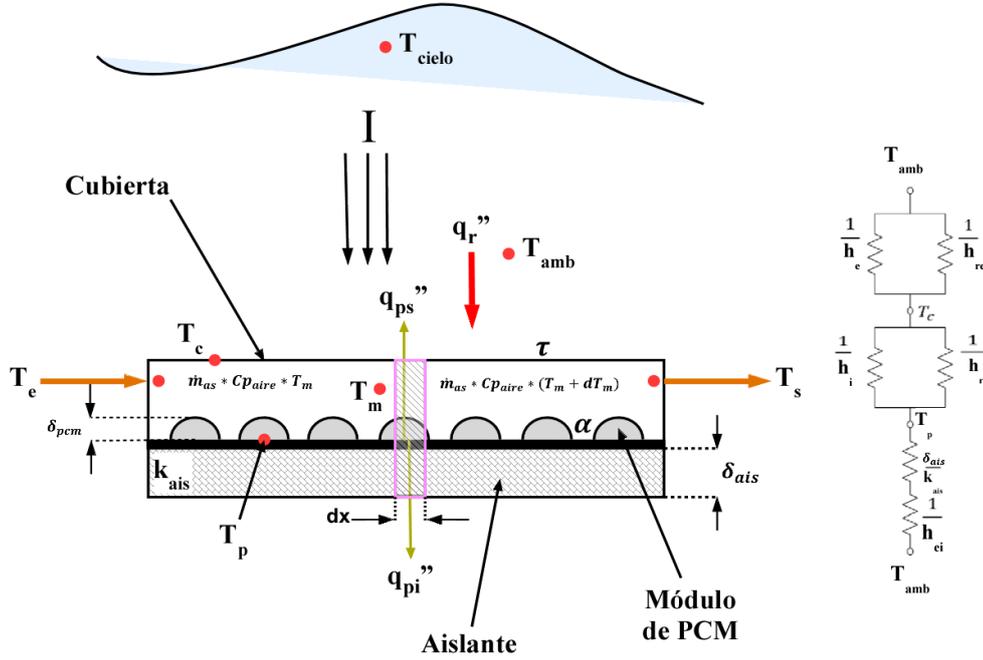


Figura 2.2. Representación del proceso termodinámico en el colector solar. Fuente: Autor.

### Volumen termodinámico de aire

Sobre un volumen de aire dentro del colector se aplica un balance de energía para obtener la ecuación 2.27. El factor  $(\alpha\tau)$  representa a un fenómeno físico que se da entre la cubierta y la placa metálica y se define con la ecuación 2.28. (Giler & Romano, 2017)

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s$$

$$I * (\alpha\tau) * w_{col} * dx = \dot{m}_{as} * Cp_{aire} * dT_m + (U_{pai} + U_{pas})(T_{pm} - T_{amb}) * w_{col} * dx$$

Ecuación 2.27

$$(\alpha\tau) = \frac{\tau * \alpha}{1 - (1 - \alpha) * \rho_d}$$

Ecuación 2.28

Donde:  $I$ : irradiancia solar ( $W/m^2$ ),  $Cp_{aire}$ : calor específico del aire ( $kJ/kg.K$ ),  $T_p$ : temperatura media del conjunto placa-módulo PCM ( $K$ ),  $T_{amb}$ : temperatura ambiente ( $K$ ),  $w_{col}$ : ancho del colector ( $m$ ),  $L_{col}$ : longitud del colector ( $m$ ),  $\tau$ : transmisividad del vidrio 0,88,  $\alpha$ : absorptividad para placas metálicas 0,95,  $U_{pas}$ : coeficiente global de pérdidas de calor superiores ( $W/m^2.K$ ),  $U_{pai}$ : coeficiente de pérdidas de calor inferiores ( $W/m^2.K$ ),  $\rho_d$ : reflectancia difusa, 0,16. (Giler & Romano, 2017)

## **Volumen termodinámico para el conjunto placa-módulo PCM**

En este caso el calor que el conjunto placa-módulo absorbe por la incidencia de radiación solar es entregado al aire mediante convección dentro del colector, pero como se conoce que el material PCM almacena calor. Entonces, se tiene la ecuación 2.31.

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s + \dot{E}_{atm}$$

$$q''_r = h_i * (T_p - T_m) + (U_{pai} + U_{pas})(T_p - T_{amb}) + \rho_{pcm} * \delta_{pcm} * C_{p_{pcm}} * \frac{dT_p}{dt}$$

Ecuación 2.29

$$q''_r = I * (\alpha\tau)$$

Ecuación 2.30

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{I * (\alpha\tau) + h_i * T_m + (U_{pai} + U_{pas}) * T_{amb}}{\rho_{pcm} * \delta_{pcm} * C_{p_{pcm}}} - \frac{(h_i + (U_{pai} + U_{pas}))}{\rho_{pcm} * \delta_{pcm} * C_{p_{pcm}}} * T_p$$

Ecuación 2.31

Donde:  $\rho_p$ : densidad del conjunto placa-módulo ( $W/m^2$ ),  $C_{p_p}$ : calor específico del conjunto placa-módulo ( $kJ/kg.K$ ),  $\delta_p$ : espesor del conjunto placa-módulo (m),  $\frac{dT_p}{dt}$ : tasa de cambio de la temperatura superficial del conjunto placa-módulo PCM respecto al tiempo (K/s).

Se realiza un reemplazo equivalente de los factores constantes y se resuelve la ecuación 2.31.

$$D = \frac{I * (\alpha\tau) + h_i * T_m + (U_{pai} + U_{pas}) * T_{amb}}{\rho_p * \delta_p * C_{p_p}} \quad F = \frac{(h_i + (U_{pai} + U_{pas}))}{\rho_p * \delta_p * C_{p_p}}$$

$$T_p = T_e * e^{-F*t_p} + \frac{D}{F} * (1 - e^{-F*t_p})$$

Ecuación 2.32

El término  $t_p$  es el tiempo que se requiere para estabilizar la temperatura del conjunto placa-módulo, y cuando se llega a esta estabilidad se tiene la ecuación 2.33.

$$q''_r = h_i * (T_p - T_m) + (U_{pai} + U_{pas})(T_p - T_{amb})$$

Ecuación 2.33

### **2.2.3.3 Dimensionamiento del colector**

Ya obtenidas las ecuaciones del modelo matemático, se calcula las dimensiones del colector aplicando un método iterativo en Matlab.

### Longitud del colector

Con la ecuación 2.27 se consigue la ecuación 2.34. Para determinar la temperatura superficial del conjunto placa-módulo PCM, se despeja la ecuación 2.33.

$$L_{col} = \frac{\dot{m}_{as} * C_{p_{aire}} * (T_{sec} - T_{amb})}{(I * (\alpha\tau) - (U_{pai} + U_{pas})(T_{pm} - T_{amb})) * w_{col}}$$

Ecuación 2.34

$$T_p = \frac{q''_r + (h_i * T_m + (U_{pai} + U_{pas}) * T_{amb})}{h_i + (U_{pai} + U_{pas})}$$

Ecuación 2.35

### Irradiancia solar

Para la zona de la parroquia de Pacto, se tiene un valor promedio de 4,2 (kWh/m<sup>2</sup>.día)(ver Anexo IV). El valor de insolación diaria para Ecuador es de 5 horas (Roa & Ortega, 2011).

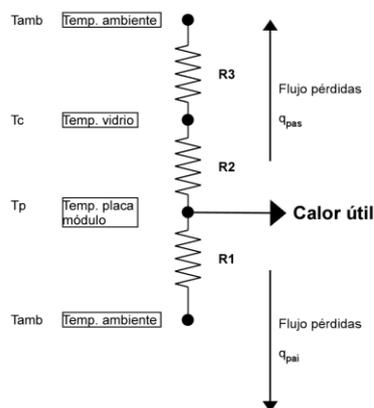
### Coefficiente global de transferencia de calor zona superior $U_{pas}$

$$U_{pas} = \frac{(h_e + h_{re}) * (h_i + h_{ri})}{h_e + h_{re} + h_i + h_{ri}}$$

Ecuación 2.36

Donde:  $h_e$ : coeficiente de convección del aire,  $h_i$ : coeficiente de convección interna (W/m<sup>2</sup>.K),  $h_{re}$ : coeficiente de radiación entre el cielo y la cubierta transparente (W/m<sup>2</sup>.K),  $h_{ri}$ : coeficiente de radiación entre el conjunto placa-módulo y la cubierta transparente (W/m<sup>2</sup>.K).

Para la primera iteración la temperatura de la cubierta se establece con un valor como se describe en las consideraciones para el diseño del colector.



**Figura 2.3.** Circuito térmico del colector solar. Fuente: Autor.

$$\frac{T_p - T_c}{R_2} = \frac{T_c - T_{amb}}{R_3}$$

$$T_c = \frac{T_p * (h_i + h_{ri}) + T_e * (h_e + h_{re})}{h_e + h_{re} + h_i + h_{ri}}$$

Ecuación 2.37

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el cielo y la cubierta  $h_{re}$  se lo formula en la ecuación 2.40. La temperatura del cielo se determina mediante la ecuación 2.41. (De la Torre, 2015)

$$q''_{rc} = \varepsilon_c * \sigma * (T_c^4 - T_{cielo}^4)$$

Ecuación 2.38

$$q''_{rc} = h_{re} * (T_c - T_{amb})$$

Ecuación 2.39

$$h_{re} = \frac{\varepsilon_c * \sigma * (T_c^4 - T_{cielo}^4)}{(T_c - T_{amb})}$$

Ecuación 2.40

$$T_{cielo} = 0,0552 * T_{amb}^{1,5}$$

Ecuación 2.41

Donde:  $\varepsilon_c$ : emisividad del vidrio; 0,9 (De la Torre, 2015).

El coeficiente de convección para el interior del colector  $h_i$  se calcula con la ecuación 2.42.

$$h_i = \frac{Nu_{Dh} * k_{aire}}{D_h}$$

Ecuación 2.42

$$k_{aire} = (0,03743 + 7,9889E^{-4} * T_m - 1,6889E^{-7} * T_m^2) * 0,1$$

Ecuación 2.43

El diámetro hidráulico para ductos con sección rectangular se halla con la ecuación 2.44 (De la Torre, 2015). En la iteración inicial se asume un valor del ancho del colector  $w_{col}$  igual que el de la cámara de deshidratación. El Reynolds para una sección rectangular se define en la ecuación 2.45. (De la Torre, 2015)

$$D_h = \frac{2 * h_{col} * w_{col}}{h_{col} + w_{col}}$$

Ecuación 2.44

$$Re_{col} = \frac{2 * \dot{m}_{aire}}{\mu_{aire} * (h_{col} + w_{col})}$$

Ecuación 2.45

$$\mu_{aire} = \frac{(1,467E^{-6} * T_m^{1,5})}{107,87 + T_m}$$

Ecuación 2.46

El número de Reynolds para una sección rectangular se define en la ecuación 2.47 (De la Torre, 2015). Para calcular valor del Nusselt con un régimen en flujo laminar (Reynolds menor a 10000) se utiliza la tabla 2.8.

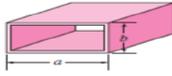
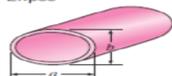
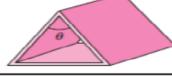
$$Re_{col} = \frac{2 * \dot{m}_{aire}}{\mu_{aire} * (h_{col} + w_{col})}$$

Ecuación 2.47

$$\mu_{aire} = \frac{(1,467E^{-6} * T_m^{1,5})}{107,87 + T_m}$$

Ecuación 2.48

**Tabla 2.8.** Número de Nusselt para secciones transversales de diferentes formas. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Configuración geométrica del tubo	a/b o θ°	Número de Nusselt		Factor de fricción f
		T <sub>s</sub> = Const.	q̇ <sub>s</sub> = Const.	
Círculo 	—	3.66	4.36	64.00/Re
Rectángulo 	a/b 1 2 3 4 6 8 ∞	2.98 3.39 3.96 4.44 5.14 5.60 7.54	3.61 4.12 4.79 5.33 6.05 6.49 8.24	56.92/Re 62.20/Re 68.36/Re 72.92/Re 78.80/Re 82.32/Re 96.00/Re
Elipse 	a/b 1 2 4 8 16	3.66 3.74 3.79 3.72 3.65	4.36 4.56 4.88 5.09 5.18	64.00/Re 67.28/Re 72.96/Re 76.60/Re 78.16/Re
Triángulo 	θ 10° 30° 60° 90° 120°	1.61 2.26 2.47 2.34 2.00	2.45 2.91 3.11 2.98 2.68	50.80/Re 52.28/Re 53.32/Re 52.60/Re 50.96/Re

Ahora el coeficiente de radiación interno  $h_{ri}$  entre dos planos paralelos se calcula con la ecuación 2.49 (De la Torre, 2015). La emisividad  $\epsilon_p$  para placas metálicas es 0,85. (Giler & Romano, 2017)

$$h_{ri} = \frac{\sigma * (T_p^2 + T_c^2) * (T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1}$$

Ecuación 2.49

**Coficiente global de transferencia de calor zona inferior  $U_{pai}$**

$$U_{pai} = \frac{h_e * k_{ais}}{\delta_{ais} * h_e + k_{ais}}$$

Ecuación 2.50

El coeficiente de pérdidas inferiores se considera un valor recomendado de 1 (W/m<sup>2</sup>.k), con esto se calcula el espesor del aislante  $\delta_{ais}$  (Giler & Romano, 2017). Como material aislante para el colector se propone usar la lana de vidrio, además se recomienda que el espesor recomendado esté entre 30 a 50 mm (De la Torre, 2015).

## 2.2.4 Diseño de la chimenea

La altura de la chimenea se puede determinar conociendo las caídas de presiones en cada elemento implicado en el proceso del secado.

### 2.2.4.1 Flujo volumétrico de aire

Se determina mediante el producto del flujo másico de aire por su volumen específico a temperatura de secado (1,031 m<sup>3</sup>/kg).

$$\dot{V}_{as} = \dot{m}_{as} * v_{as}$$

Ecuación 2.51

### 2.2.4.2 Caídas de presión del deshidratador solar indirecto

La variación de presión total se define en la ecuación 2.52.

$$\Delta P_{sis} + P_{chi} = \Delta P_{col} + \Delta P_{ccafe} + \Delta P_{chi} + \Delta P_{bpc} + \Delta P_{csc}$$

Ecuación 2.52

### Presión de empuje del sistema

Debido a los cambios de temperatura en el secador se producen cambios de densidades del aire durante, fenómeno conocido como la fuerza de Boyantez (De la Torre, 2015).

$$F_{BO} = \rho_{aire} * g * \beta_{tv} * \Delta T$$

Ecuación 2.53

$$\Delta P_{sis} = \frac{F_{BO} * V_{cs}}{A_{ts}}$$

Ecuación 2.54

Donde:  $F_{BO}$ : fuerza de Boyante del sistema (N/m<sup>3</sup>),  $\rho_{aire}$ : densidad del aire a la temperatura media (kg/m<sup>3</sup>),  $g$ : gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>),  $\beta_{tv}$ : coeficiente térmico de expansión volumétrica a la temperatura media del aire en el colector (K<sup>-1</sup>).

### Caída de presión en la capa de café

Cuando el aire de secado atraviesa la capa de café sufre una caída en su presión, esta se calcula con la ecuación 2.55 (De la Torre, 2015).

$$\Delta P_{ccafe} = \frac{e_{ccafe} * Re_{ccafe} * \mu_{ccafe}^2}{\rho_{aire} * \phi_{cafe}^3} * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \left[ 1,24 * \frac{Re_{ccafe}}{(1 - \varepsilon)} + 368 \right]$$

Ecuación 2.55

Donde:  $e_{ccafe}$ : espesor de la capa de café (0,025 m),  $Re_{ccafe}$ : número de Reynolds en la capa de café,  $\mu_{ccafe}$ : viscosidad dinámica para una temperatura del grano (N.s/m<sup>2</sup>),  $\varepsilon$ :

porosidad de la capa de café (0,51),  $\rho_{aire}$ : densidad del aire a la temperatura de grano ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\phi_{cafe}$ : diámetro equivalente del grano de café (0,0059 m).

$$\mu_{ccafe} = \frac{(1,467 * 10^{-6} * T_{cafe}^{1,5})}{107,87 + T_{cafe}}$$

Ecuación 2.56

$$Re_{ccafe} = \frac{\dot{m}_{ais} * \phi_{cafe}}{A_{ts} * \varepsilon * \mu_{ccafe}}$$

Ecuación 2.57

### **Caída de presión en el colector solar**

Se presenta debido a la fricción entre las paredes internas y el aire de secado, se calcula con la ecuación 2.58. (De la Torre, 2015)

$$\Delta P_{col} = \frac{f_{col} * \rho_{aire} * L_{cole} * (w_{cole} + h_{cole})}{w_{cole} * h_{cole}} * v_{aic}^2$$

Ecuación 2.58

$$v_{aic} = \frac{\dot{m}_{ais}}{\rho_{aire} * w_{cole} * h_{cole}}$$

Ecuación 2.59

Donde:  $f_{col}$ : factor de fricción para el colector,  $L$ : longitud del colector (m),  $v_{aic}$ : velocidad del aire de secado dentro del colector (m/s).

### **Caída de presión en la bandeja**

Se recomienda tomar el 10% del valor obtenido en la caída de presión de la capa de café. (De la Torre, 2015)

### **Caída de presión en la chimenea**

En la chimenea sólo se generan caídas de presión debido a la fuerza de fricción del aire de secado. Para el diámetro de la chimenea se recomienda usar un valor entre 10-20 cm en SSI, por lo que se elige un valor de 15 cm (De la Torre, 2015). La temperatura superficial ( $T_g$ ) grano se toma un valor de 36 °C como lo indican los datos experimentales.

$$\Delta P_{chi} = \frac{4 * f_{chi} * \rho_{aire} T_g * h_{chi}}{\phi_{chi}} * v_{aich}^2$$

Ecuación 2.60

$$Re_{chi} = \frac{4 * \dot{m}_{aire}}{\rho_{aire} T_g * \pi * \phi_{chi}}$$

Ecuación 2.61

$$v_{aich} = \frac{4 * \dot{m}_{aire}}{\rho_{aire} T_g * \pi * \phi_{chi}^2}$$

Ecuación 2.62

## Caída de presión por cambio de sección

Se calcula con la ecuación 2.63, donde el coeficiente de pérdidas  $k$  se obtiene relacionando las áreas transversales de cada sección (cámara y chimenea) y se obtiene el valor con la figura 2.4.

$$\Delta P_{csc} = k_{chi} * \frac{v_{chi}^2}{2} \frac{A_{t\ chi}}{A_{t\ cam}}$$

Ecuación 2.63

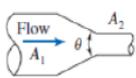
	Included Angle, $\theta$ , Degrees							
	$A_2/A_1$	10	15-40	50-60	90	120	150	180
	0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
	0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
	0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Figura 2.4. Coeficientes de pérdidas para cambios de sección de flujo. Fuente: (De la Torre, 2015).

### 2.2.4.3 Altura de la chimenea y de la cubierta

A partir de la ecuación 2.64 se calcula el valor de la altura de la chimenea. La altura de la cubierta o sombrero se determina con la ecuación 2.65.

$$g * \rho_{aire} T_g * h_{chi} = \Delta P_{col} + \Delta P_{ccafe} + 4,75 * h_{chi} + \Delta P_{bpc} + \Delta P_{csc} - \Delta P_{sis}$$

Ecuación 2.64

$$h_{cub} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire} T_{amb} * v_{chi} * \phi_{chi}}$$

Ecuación 2.65

### 2.2.5 Selección del ventilador

Para selección adecuada de un tipo de ventilador se requiere conocer algunas variables importantes como son el flujo volumétrico de aire y las caídas de presiones en todo el deshidratador, con ello se determina las características que debe tener el ventilador.

### 2.2.6 Sistema de resistencia eléctrica

El diseño de este sistema se basa en el cálculo de la potencia eléctrica necesaria para el calentamiento del aire. Este sistema opera como fuente calórica al secador sólo cuando las condiciones de radiación solar no son favorables.

$$Pot = \dot{m}_{ais} * (h_{aire\ 50^\circ C} - h_{aire\ 21^\circ C})$$

Ecuación 2.66

## Diagrama circular de la Ley de Ohm

La figura 2.5 muestra todas las variantes posibles de la ley de Ohm, permite calcular el término faltante de la ecuación conociendo los otros dos.

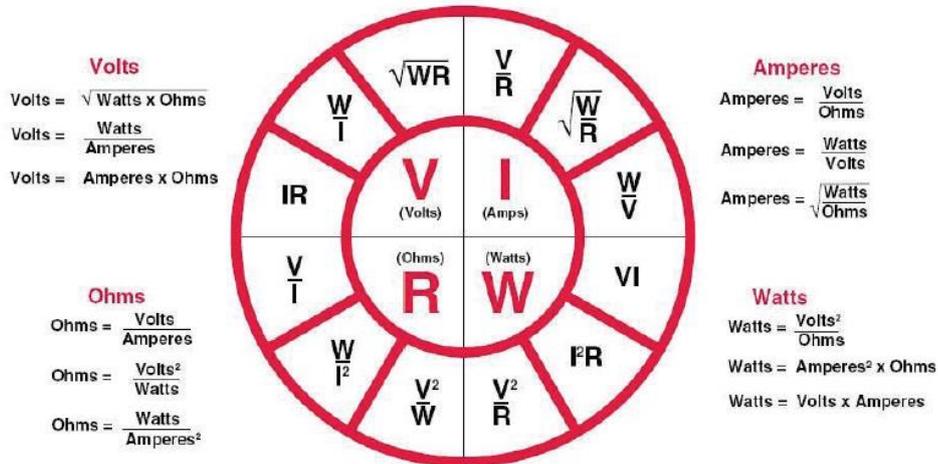


Figura 2.5. Diagrama circular de la Ley de Ohm. Fuente: (Cerón & Guerrero, 2015)

El material que se recomienda usar para el alambrado es el Nichrome 80 uno de los más usados para aplicaciones de calentamiento de aire, las especificaciones técnica que se presentan en la figura 2.6.

Composición Química Aproximada		Propiedades	
Ni	80%	DENSIDAD	8.31 g/cm <sup>3</sup>
Cr	20%	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	
		A 20 °C (microhms · cm)	108
		A 20 °C (ohms · mil circular/pie)	650
		TEMPERATURA DE OPERACIÓN MÁXIMA	1200 °C 2200 °F
		PUNTO DE FUSIÓN	1400 °C 2550 °F
		COEFICIENTE DE EXPANSIÓN	12.5 µm/m °C (20 - 100 °C)

Factor Resistencia-Temperatura (F) A:												
20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C
1.00	1.006	1.015	1.026	1.045	1.065	1.068	1.057	1.051	1.052	1.062	1.071	1.080

Figura 2.6. Propiedades de la resistencia eléctrica Nicrome 80. Fuente: (Cerón & Guerrero, 2015)

Con las ecuaciones de la sección 1.4.9 se determina las dimensiones del alambre que se debe usar.

## 2.2.7 Eficiencia del deshidratador

- Eficiencia del colector

$$\eta_{cole} = \frac{\dot{Q}_u}{A_{cole} * I} * 100\%$$

Ecuación 2.67

- Eficiencia de la cámara de secado

$$\eta_{cam} = \frac{T_{sec} - T_f}{T_{sec} - T_{amb}} * 100\%$$

Ecuación 2.68

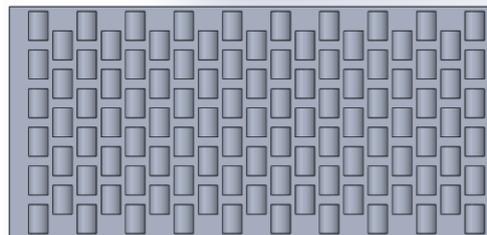
- Eficiencia del sistema

$$\eta_{secador} = \eta_{cole} * \eta_{cam} * 100\%$$

Ecuación 2.69

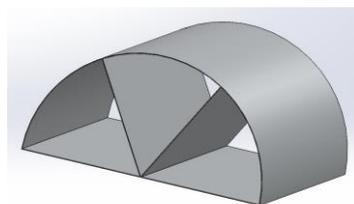
## 2.3 Selección y diseño del módulo de PCM

Para la implementación del material PCM se debe determinar cuánta masa es conveniente colocar sobre el colector, para ello se propone un tipo de distribución de unos módulos que contienen PCM sobre la placa metálica, como se indica en la figura 2.7.



**Figura 2.7.** Distribución de los módulos de PCM sobre la placa metálica. Fuente: Autor.

Se propone un módulo de aluminio de forma de medio cilindro con aletas internas que ayuden a evacuar el calor almacenado al exterior (Quishpe, 2019). Con medidas estándares para latas redondas las cuales son 10 cm de diámetro y 15 cm de largo.



**Figura 2.8.** Diseño del módulo de PCM. Fuente: Autor.

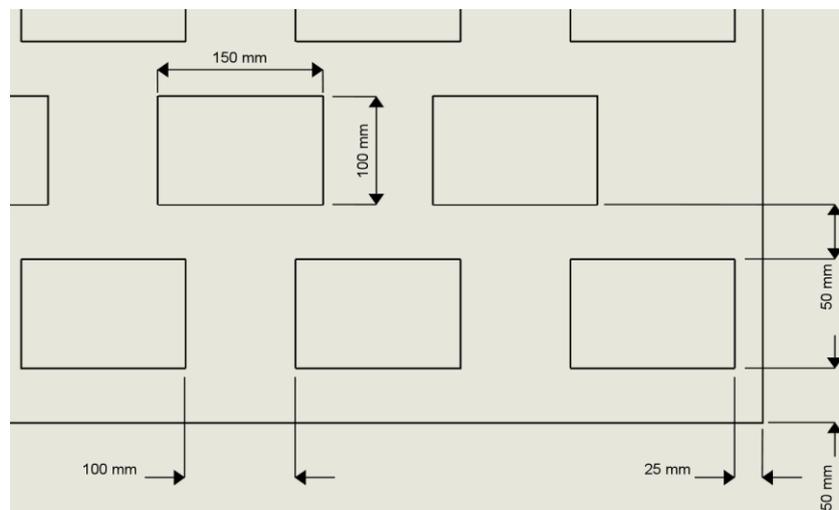
### 2.3.1.1 Selección del tipo de PCM

En un estudio comparativo realizado por (Onkar & Vinkel, 2019), entre distintas clases de materiales PCM, ha determinado que la cera parafínica es la más apta para el almacenamiento térmico en colectores solares.

**Tabla 2.9.** Propiedades de la cera parafínica. Fuente: (Onkar & Vinkel, 2019).

Propiedad	Cera parafínica
Densidad líquida ( $\text{kg/m}^3$ )	933
Densidad sólida ( $\text{kg/m}^3$ )	969
Punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	56,6
Punto de solidificación ( $^{\circ}\text{C}$ )	50,9
Calor latente de fusión ( $\text{kJ/kg}$ )	383,87
Calor latente de solidificación ( $\text{kJ/kg}$ )	320,26
Calor específico líquido ( $\text{kJ/kg.K}$ )	1,16
Calor específico sólido ( $\text{kJ/kg.K}$ )	2,1
Conductividad térmica ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ )	0,11

Se calcula la masa que se contendrá el módulo PCM para las dimensiones dadas. Cada módulo ocupará un área y una determinada separación entre ellos como se muestra en la figura 2.9. Con ello se calcula la masa total de PCM y mediante el matemático del modelo matemático descrito anteriormente se obtiene el tiempo para alcanzar la temperatura de placa para diferentes cantidades de material PCM con la ecuación 2.32.



**Figura 2.9.** Dimensiones de ubicación del módulo respecto a la placa y entre ellos. Fuente: Autor.

### 2.3.1.2 Calor almacenado en la cera parafínica

Se determina mediante la suma del calor sensible y calor latente del material PCM hasta la temperatura de la placa, se asume que al inicio la temperatura del PCM es igual a la temperatura ambiente.

$$Q_{pcm} = m_{pcm} * (Cp_{pcm\ sol} * (T_{fusion} - T_{amb}) + CL_{pcm} + Cp_{pcm\ liq} * (T_{pcm} - T_{fusion}))$$

Ecuación 2.70

## 2.4 Modelo matemático del deshidratador y simulación en Matlab

Para elaborar un modelo matemático simplificado y correcto se toma en cuenta las siguientes consideraciones :

- Los componentes del deshidratador se mantienen fijos y sólo cambiarán sus propiedades en función del tiempo.
- La temperatura del grano tendrá el mismo valor que la temperatura del aire circundante al grano.
- Los flujos de transferencia de calor y el flujo de aire se consideran unidireccionales.

### Balance de masa

Define que la masa dentro del volumen de control es constante, es decir que la misma cantidad de masa que sale debe ser igual a la masa que entra. La ecuación 2.71 describe este balance de masa. La cantidad de masa de agua evaporada mediante la ecuación 2.72.

$$\frac{d(mvc)}{dt} = \dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sale}$$

Ecuación 2.71

$$\dot{m}_{agua\ evap} = \frac{W_i * m_{cph}}{100} - \frac{W_f * m_{cps}}{100}$$

Ecuación 2.72

### Balance de energía

Este balance establece que la variación de energía en un volumen de control es la diferencia entre la energía que entra y la energía que sale. Las pérdidas se calculan con la ecuación 2.74

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

Ecuación 2.73

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

Ecuación 2.74

$$P_{perd} = U * A_{Tcs}$$

Ecuación 2.75

### 2.4.1 Modelo matemático

Se desarrolla la ecuación 2.74 parametrizada para determinar una expresión en función del cambio de humedad y la cantidad de masa de café en el instante t.

$$m_{agua\ evap} = \frac{W_i * m_{cph}}{100} - \frac{W_f * (m_{cph} - m_{agua\ evap})}{100}$$

$$m_{agua\ evap} * \left(\frac{100 - W_f}{100}\right) = m_{cph} * \left(\frac{W_i - W_f}{100}\right)$$

$$m_{agua\ evap} * (100 - W_f) = m_{cph} * \Delta W$$

$$\frac{dm_{agua\ evap}}{dt} * (100 - W_f) = m_{cph} * \frac{d(\Delta W)}{dt}$$

$$\frac{d(\Delta W)}{dt} = \frac{m_{agua\ evap}}{m_{agua\ evap} + m_{cps}} * (100 - W_f) * \dot{m}_{cph}$$

Ecuación 2.76

La ecuación 2.77 parametrizada se obtiene a partir del desarrollo de la ecuación del balance de energía en un volumen de control del secado.

$$m_{cafe} * Cp_{cafe} * \frac{d(\Delta T)}{dt} + \dot{m}_{aire} * Cp_{aire} * \Delta T = \dot{Q}_{sec} - P_{perd} * \Delta T$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \left(\frac{\dot{Q}_{sec}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) - \left[\left(\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) + \left(\frac{P_{perd}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right)\right] * \Delta T$$

Ecuación 2.77

### Ecuaciones espacio-estado

$$\begin{bmatrix} \frac{d(\Delta T)}{dt} \\ \frac{d(\Delta W)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) - \left(\frac{P_{perd}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{cafe} * Cp_{cafe}} & 0 \\ 0 & \frac{m_{agua\ evap}}{(m_{agua\ evap} + m_{cps})^2} * (100 - W_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_{sec} \\ \dot{m}_{cph} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\dot{m}_{aire} * Cp_{aire}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) - \left(\frac{P_{perd}}{m_{cafe} * Cp_{cafe}}\right) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{cafe} * Cp_{cafe}} & 0 \\ 0 & \frac{m_{agua\ evap}}{(m_{agua\ evap} + m_{cps})^2} * (100 - W_f) \end{bmatrix}$$

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

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

#### **2.4.2 Simulación numérica del modelo matemático**

La ejecución de la simulación numérica se realiza en el programa Matlab (ver Anexo VI), y se divide en las siguientes etapas:

##### **Fase de entrada de datos**

En esta sección del código se designan todos los valores de parámetros y de las variables que se requieren para el proceso de la simulación del código y para el cálculo de ciertos valores como dimensiones, temperaturas, entre otras.

##### **Fase de desarrollo**

En esta fase se ejecuta el código en el cual se puede realizar cambios en ciertas variables para analizar la afectación de esos cambios, además, se implementa establece el tipo de control más conveniente a usar.

##### **Fase de resultados**

Se muestran los resultados como gráficos, valores de variables, entre otras, para su análisis y optimización.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentan los valores obtenidos en los cálculos. Se realiza la interpretación de los datos obtenidos y un análisis de estos para determinar si se requiere una modificación y/u optimización de los procesos y/o del modelo matemático elaborado. Posteriormente se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo de este proyecto.

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Dimensionamiento de la cámara.

###### 3.1.1.1 Bandejas de secado

Tabla 3.1. Parámetros para el dimensionamiento de las bandejas de secado. Fuente: Autor.

Masa café pergamino húmedo (kg)	Área de bandeja (m <sup>2</sup> )	Número total de bandejas	Densidad de carga (kg/m <sup>2</sup> )
21,92	1,26	2	15,22

Tabla 3.2 Dimensiones de la bandeja. Fuente: Autor.

Dimensión	Valor (m)
Ancho (a)	0,60
Largo (b)	1,20
Alto ( $h_b$ )	0,03

Tabla 3.3. Parámetros para determinar el espesor de la bandeja. Fuente: Autor.

Carga por bandeja (N/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo de diseño (MPa)	Espesor de la bandeja (mm)
149,31	206,67	1,5

###### 3.1.1.2 Paredes internas, espesor del aislante y paredes externas

Tabla 3.4. Dimensiones de la cámara interna. Fuente: Autor.

Dimensiones	Valor
Altura, $H_{cam}$ (m)	0,45
Largo, $L_{cam}$ (m)	1,26
Ancho, $A_{cam}$ (m)	0,60

**Tabla 3.5.** Datos del espesor del aislante (lana de vidrio). Fuente: Autor.

Espesor del aislante	Valor (mm)
Calculado	26,25
Optimizado	40

**Tabla 3.6.** Dimensiones de las paredes externas de la cámara. Fuente: Autor.

Dimensiones	Valor
Altura, $H_{ecam}$ (m)	0,53
Largo, $L_{ecam}$ (m)	1,34
Ancho, $A_{ecam}$ (m)	0,68

### 3.1.2 Tiempo de secado

**Tabla 3.7.** Propiedades del aire húmedo obtenidas en el software PsyChart. Fuente: Autor.

Etapa	Aire ambiente	Aire a la entrada	Aire a la salida
Temperatura de bulbo seco (°C)	21	50	28,25
Temperatura de bulbo húmedo (°C)	19,17	26,56	26,36
Entalpía (kJ/kg <sub>as</sub> )	58,75	88,67	88,67
Razón de humedad abs. (g <sub>H2O</sub> /kg <sub>as</sub> )	14,79	14,79	23,58
Humedad relativa (%)	85	17,09	86,62
Volumen específico (m <sup>3</sup> /kg <sub>as</sub> )	0,939	1,031	0,975

**Tabla 3.8.** Propiedades del aire a temperatura de secado. Fuente: Autor.

$h_{fg@50^{\circ}\text{C}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$Pr$	$\mu_{aire} \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{s}} \right]$	$k_{aire} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$	$c_{p\text{aire}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
2382	0,7037	1,95E-5	28E-3	1008

**Tabla 3.9.** Valores de factores y tiempo de secado. Fuente: Autor.

$Re$	$Nu$	$h_c \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	$R_c \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$	$t_{sec} [h]$	$t_{sec} [h] opt.$
492,31	39,11	171,10	1008	7,5	8

### 3.1.3 Calor requerido para el secado

#### 3.1.3.1 Cantidad de agua a evaporar

**Tabla 3.10.** Masa seca y masa de agua en cada estado del grano de café. Fuente: Autor.

Masa seca de café (kg)	Masa de agua en cph (kg)	Masa de agua en cps (kg)	Masa de agua a evaporar (kg)
10	12,06	1,36	10,70

#### 3.1.3.2 Cálculo de la temperatura superficial exterior de la cámara de secado

**Tabla 3.11.** Variables implicadas para el cálculo de calor de secado. Fuente: Autor.

$m_{pib} [kg]$	$X_{cph} [\% b. s.]$	$X_{cps} [\% b. s.]$	$CP_{cafe} \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	$h_{fg} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	$h_{cv} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$A_{Tcs} [m^2]$
44,23	122,22	13,64	8,43	2451,39	8,8	3,06

**Tabla 3.12.** Iteraciones para determinar la temperatura exterior de la cámara. Fuente: Autor.

Iteración	$T_{se} (K)$	$h_r (W/m^2 \cdot K)$	$q_{perd} (W)$	$T_{se} (K)$
0	299,000	5,025	73,020	295,726
1	295,726	4,942	72,994	295,736
2	295,736	4,943	72,994	295,736

**Tabla 3.13.** Porcentaje del calor de pérdidas por las paredes de la cámara con y sin aislante. Fuente: Autor.

$q_{perd}$	Valor
Con aislante (W)	73
Sin aislante (W)	1145,05
Porcentaje (%)	6

**Tabla 3.14.** Calor requerido para obtener 1 arroba de café pergamino seco. Fuente: Autor.

$Q_{cafe} [kJ]$	$Q_{scam} [kJ]$	$Q_{s H2O} [kJ]$	$Q_{vapor} [kJ]$	$Q_{perd} [kJ]$	$Q_{res} [kJ]$	$Q_{secado} [kJ]$
2444,70	641,34	580,97	26229,02	2102,4	73,84	32072,27

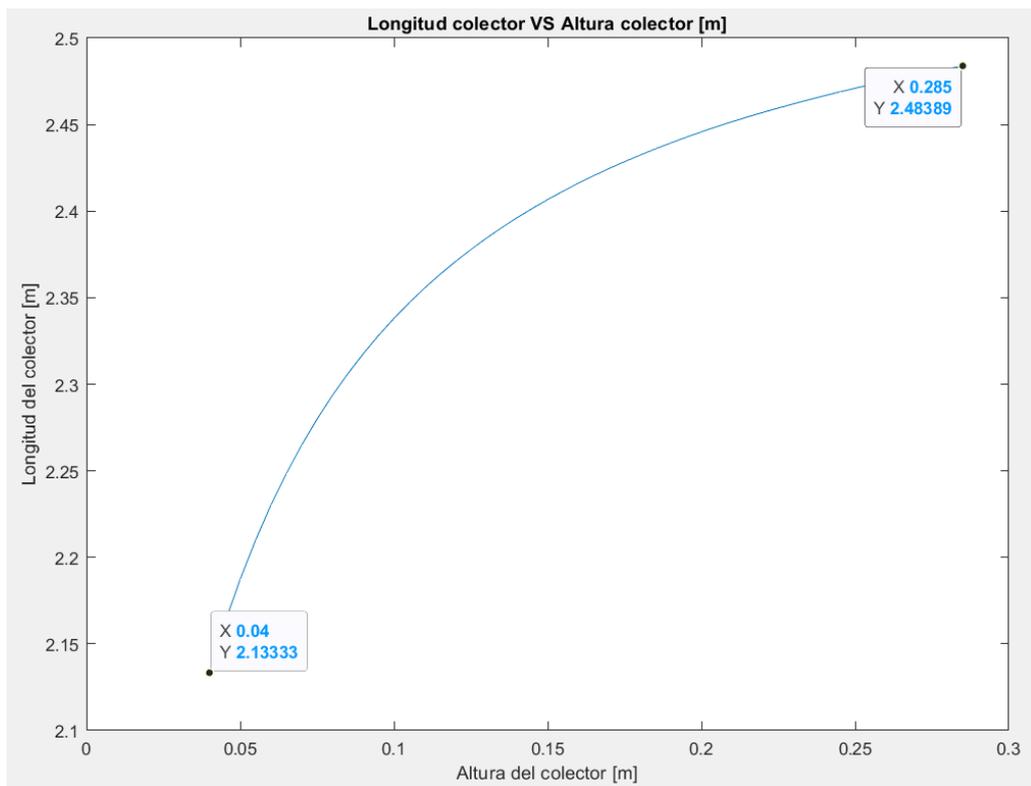
### 3.1.4 Dimensionamiento del colector solar

Al valor calculado del espesor del aislante se le adiciona unas unidades por cuestiones de efectividad y diseño.

**Tabla 3.15.** Variables iniciales para las iteraciones en el modelo matemático. Fuente: Autor.

$\dot{m}_{as} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$T_m [K]$	$I \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	$T_c [K]$	$\delta_{ais} [m]$	$U_{pai} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
0,038	308,5	840	301,25	0,35	0,90

El gráfico 3.1 muestra la relación entre la longitud del colector y su altura. Las iteraciones realizadas en la simulación del modelo matemático en Matlab muestran los siguientes resultados de las variables para un espesor de colector seleccionado de 0,055 m por recomendación y disposición para la instalación del material PCM.



**Figura 3.1.** Relación de la altura del colector y su longitud. Fuente: Autor.

Se puede analizar que para alturas menores a 20 cm la longitud del colector aumenta proporcionalmente mientras que pasado ese valor la longitud aumenta a un ritmo desacelerado.

**Tabla 3.16.** Coeficientes de transferencia de calor, dimensiones y temperaturas del colector. Fuente: Autor.

Coeficientes de transferencia de calor de convección y radiación $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$			
$h_{ri}$	$h_{re}$	$h_i$	$U_{pas}$
7,57	8,60	1,92	6,14
Dimensiones del colector [m]			
$h_{col}$ [m]	$w_{col}$ [m]	$L_{col}$ [m]	
0,055	1,20	2,21	
Temperaturas dentro del colector [K]			
$T_c$ [K]	$T_p$ [K]	$T_{pm}$ [K]	
322,98	376,13	335,07	

### 3.1.5 Dimensionamiento de la chimenea

**Tabla 3.17.** Flujo volumétrico de aire de secado. Fuente: Autor.

Flujo volumétrico de aire $\dot{V}_{as}$		
$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	$\left[\frac{m^3}{min}\right]$	[CFM]
0,04	2,35	83

El factor de fricción para flujo turbulento se determina mediante la rugosidad del material del ducto y su diámetro hidráulico, en el diagrama de Moody, se obtiene un valor de 0,045.

**Tabla 3.18.** Variables de cálculo para determinar las caídas de presión. Fuente: Autor.

$v_{aisc} \left[\frac{m}{s}\right]$	$F_{BO} \left[\frac{N}{m^3}\right]$	$\mu_{ccafe} \left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$	$Re_{ccafe}$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$Re_{chi}$	$f_{chi}$	$v_{atch} \left[\frac{m}{s}\right]$
0,61	0,958	0,45	31,58	0,994	16887,64	0,04	2,07

**Tabla 3.19.** Caídas de presión en todo el secador. Fuente: Autor.

$\Delta P_{sis}$ [Pa]	$\Delta P_{ccafe}$ [Pa]	$\Delta P_{col}$ [Pa]	$\Delta P_{bpc}$ [Pa]	$\Delta P_{chi}$ [Pa]	$\Delta P_{csc}$ [Pa]
0,45	1,23	0,71	0,123	$4,75 * h_{chi}$	0,87

**Tabla 3.20.** Altura de la chimenea y de su cubierta. Fuente: Autor

$h_{chi}$ [m]	$h_{cub}$ [m]
0,45	0,11

### 3.1.6 Selección del ventilador

Como se puede ver el valor de la caída de presión es bajo por lo que los requerimientos del ventilador son mínimos, se escoge un ventilador centrífugo de descarga rectangular por facilidades de diseño. Una opción se muestra en la figura 3.2.

$$P_{total} = 5,07 [Pa] = 0,02 [plg H_2O] = 0,052 cma$$

**Tabla 3.21.** Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo T2. Fuente: (Equipos, 2024)

Voltaje (V)	110
Velocidad (rpm)	1700 - 3600
Potencia (W)	30
Corriente (A)	0,5
Flujo (CFM)	150
Salida aire (cm)	7x6
Diámetro entrada aire (cm)	6,5



**Figura 3.2.** Ventilador centrífugo. Fuente: (Equipos, 2024)

### 3.1.7 Sistema de resistencia eléctrica

**Tabla 3.22.** Diámetro y longitud del alambre de Nicrome 80. Fuente: Autor.

$Pot$ [W]	$d$ [cm]	$l$ [cm]
1137	0,10	793

### 3.1.8 Eficiencia del deshidratador solar

Tabla 3.23. Eficiencia parcial y total del deshidratador. Fuente: Autor.

$\eta_{cole}$ [%]	$\eta_{cam}$ [%]	$\eta_{sec}$ [%]
50	75	38

### 3.1.9 Dimensionamiento del módulo PCM

#### Análisis del tiempo para calentar el material PCM a la temperatura de la placa metálica

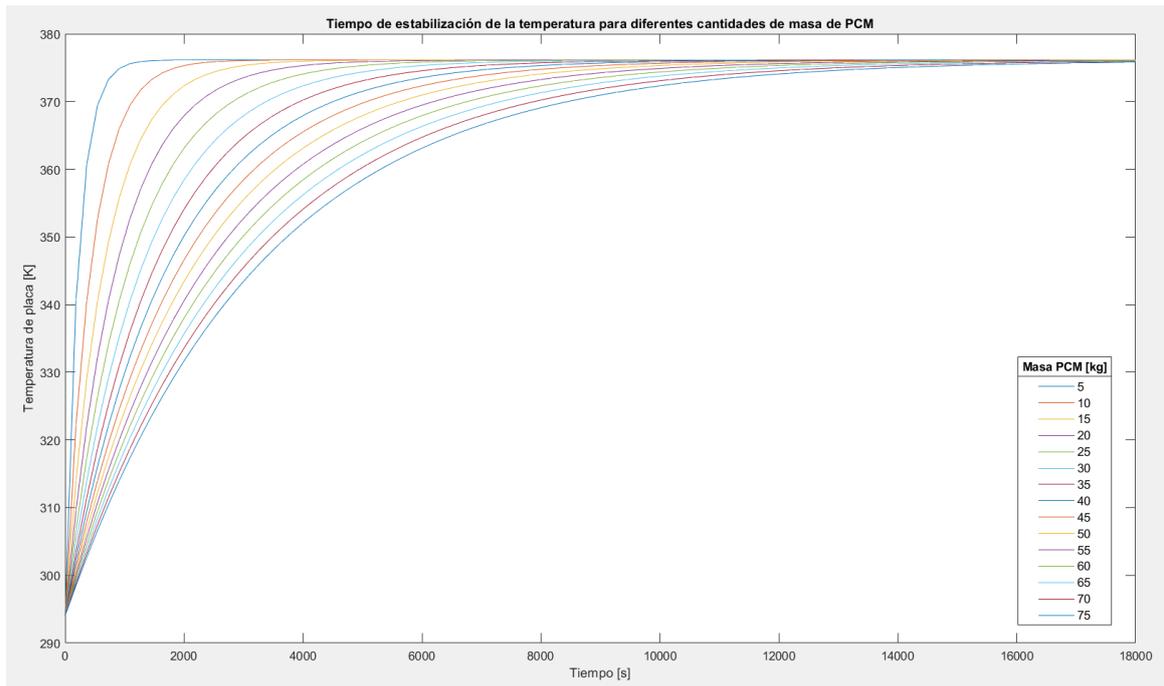


Figura 3.3. Tiempo de estabilización de la temperatura del PCM según la cantidad. Fuente: Autor.

Como se puede observar que no es conveniente llenar de material PCM al colector pues a grandes cantidades llevaría demasiado tiempo calentarlo y también se debe recordar que las horas de brillo solar son 5 horas y el tiempo total de secado es de 8 horas, con base a estas consideraciones se selecciona 40 [kg] y toma 3 horas en almacenar energía térmica.

Tabla 3.24. Dimensiones y cantidad de masa del material PCM en el colector. Fuente: Autor.

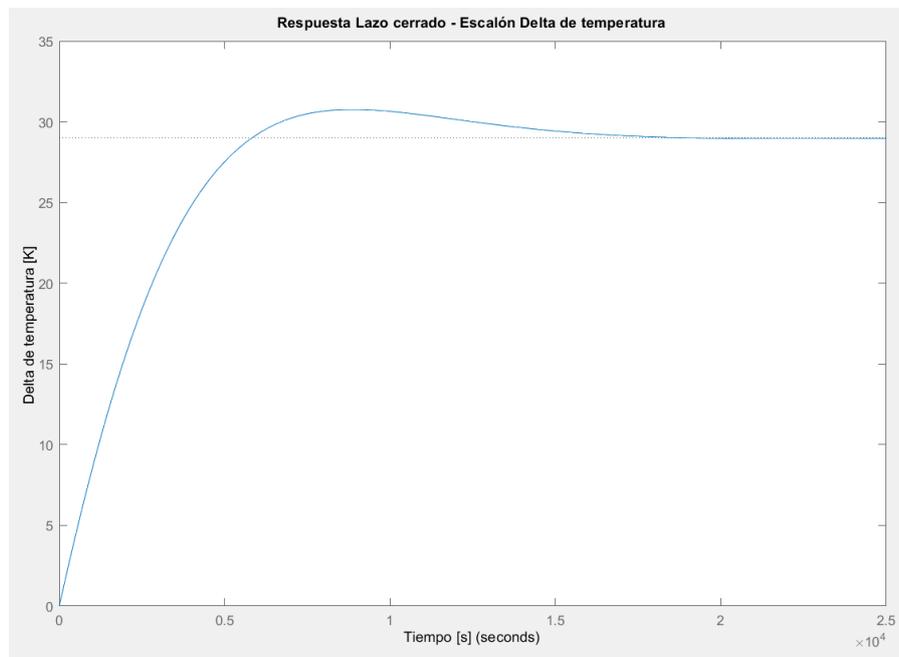
$\phi_{pcm}$ [cm]	$l_{pcm}$ [cm]	$m_{pcm}$ [kg]	módulos	$m_{total\ pcm}$ [kg]
10	15	0,55	72	40

Tabla 3.25. Calor almacenado en 40 kg de material PCM. Fuente: Autor.

$Q_{pcm}$ [kJ]	$Q_{seca}$ [kJ]	$Q_{extra}$ [%]
20504	32072,27	64

Con base al resultado mostrado en la simulación del modelo matemático el calor que ofrece los 40 kg de material PCM para el secado es del 64% del total requerido para el proceso de secado.

### 3.1.10 Estabilización de la temperatura durante el secado



**Figura 3.4.** Tiempo de estabilización de la temperatura de secado, con control PID. Fuente: Autor.

Como puede observarse en la figura 3.5 para lograr alcanzar la temperatura de secado el tiempo requerido es de aproximadamente de 1,6 horas con un controlador PID.

## 3.2 Conclusiones

- Se realizó el diseño del deshidratador híbrido de café de baja altura: solar y eléctrico, de baja capacidad con base a la revisión teórica y con un enfoque mecatrónico mediante el uso de herramientas de simulación computacional que permitieron analizar y optimizar el dimensionamiento de cada componente principal del secador a través de la verificación de resultados que se obtuvieron en la ejecución del código de programación en el software Matlab.
- Con base a la revisión bibliográfica se estableció que el café de baja altura, hasta 800 m, es el de tipo arábigo, el mismo que actualmente es el más comercializado en el país y el que más rentabilidad se obtiene cuando su proceso de producción es más tecnificado y especializado, además se conoció que el brillo solar en el Noroccidente de Quito tiene un valor en promedio de 4 horas.
- Se diseñó un modelo de módulo metálico de aluminio en forma de medio cilindro longitudinal que contiene a la cera parafínica (PCM), y se realizó un análisis para su distribución en el área del colector solar de una manera adecuada que permita una máxima captación y calentamiento eficiente del mismo para el almacenaje de energía térmica obteniendo un resultado del 64% de aporte del total de la energía requerida para el secado.
- Se creó un modelo de simulación numérico y de cálculos de variables para el software Matlab como base para el dimensionamiento de principales elementos del deshidratador solar indirecto de colector solar de una sola placa plana, el cual permite realizar un óptimo análisis del diseño a través de la modificación de los parámetros dentro del código fuente.

## 3.3 Recomendaciones

- Este diseño se puede complementar con la integración de otras fuentes de energía limpias como por ejemplo la energía fotovoltaica, bombas de calor o energía geotérmica, que al combinarse en un sistema conjunto de energías pueden lograr una notable mejora en la eficiencia del deshidratador.
- El desarrollo de un sistema de automatización del proceso mediante sistemas de control le dará un gran adicional a este diseño, pudiendo mejorarlo con la ayuda de la electrónica.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abubakar, S., & Umaru, S. (2018). Development and Performance Comparison of Mixed-Mode Solar Crop Dryers with and without Thermal Storage. *Renewable Energy*.
- Arguello, D. (2020). *Colector solar térmico, con aire de superficie plana para calefacción y ventilación de áreas internas en viviendas y edificios*. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Besora, J. (2017). *Secador Solar de café*. Cajamarca: Ingeniería Sense Fronteras. Obtenido de Secador Solar de café: <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-t%C3%A9cnico-secador-solar-de-caf%C3%A9.pdf>
- Calle, R., & Aparicio, J. (2011). *Diseño de una planta de deshidratación de hierbas aromáticas*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Cengel, Y. (2012). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- CENICAFE. (2012). *Beneficiado del café II*. Obtenido de CaniCafe: [https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla\\_21.\\_Secado\\_del\\_cafe.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf)
- Cerón, E., & Guerrero, O. (2015). *Diseño y construcción de una secadora híbrida de alimento en hojuelas para peces de acuario, que opere con energía solar y eléctrica*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cerrón, S., & Junchaya, J. (2019). *Influencia de la temperatura del aire en la velocidad de secado de quinua germinada en un secador de bandejas*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Cuarán, S., & Tinillo, I. (2013). *Diseño y construcción de un prototipo deshidratador atmosférico de bandejas discontinuo con circulación forzada de una capacidad de 0.05 m<sup>3</sup> utilizando energía solar*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Cueva, M., & Chiluisa, N. (2019). *Implementación de un sistema de convección forzada mediante combustión a gas en el horno de pintura electrostática de la empresa Metal Electric*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi.

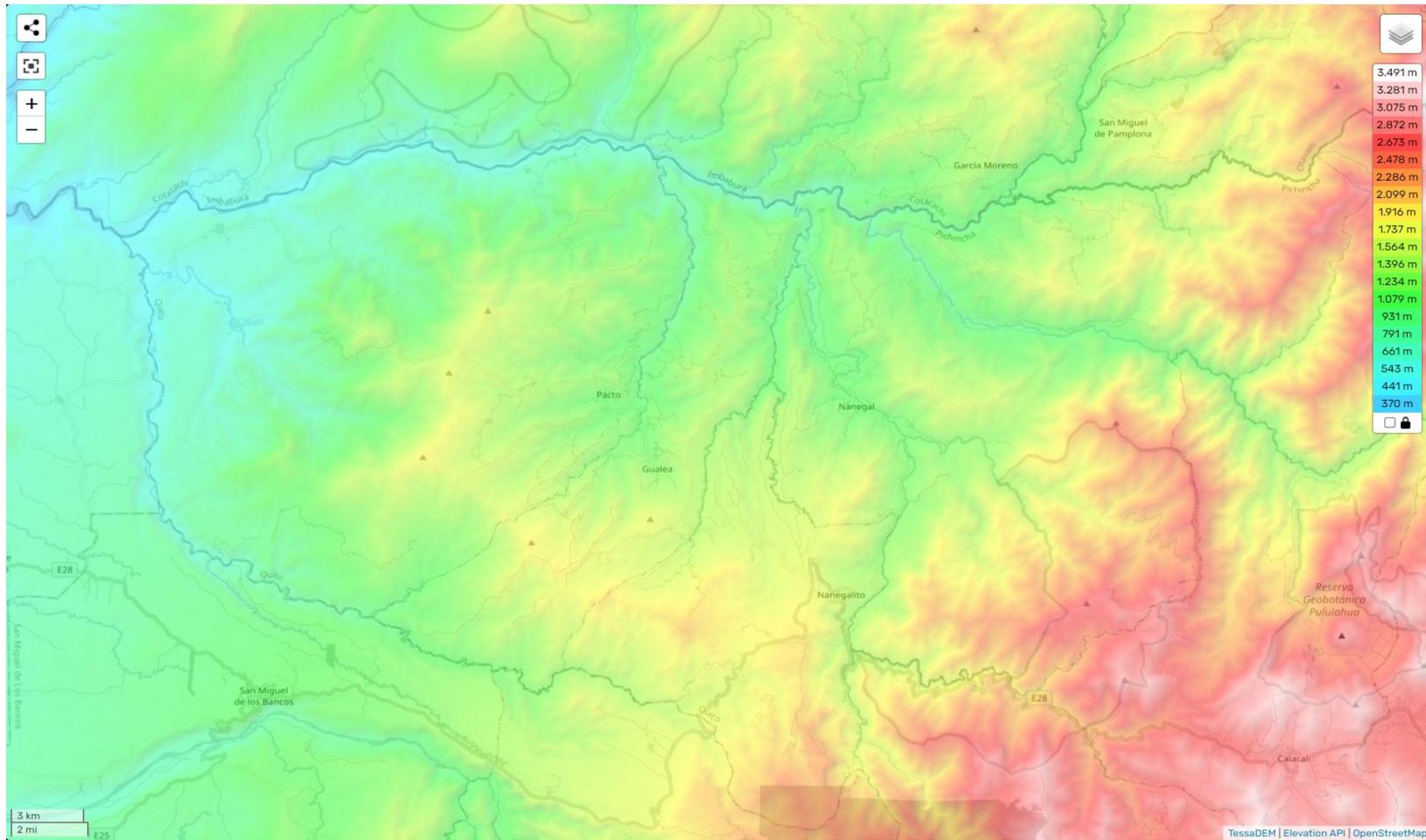
- De la Torre, J. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de secador solar para el capsicum annum (ají) con colector-almacenador en lecho de rocas con una capacidad de 25 kg*. Sangolquí: Escuela Superior Politécnica del Ejército.
- Domínguez, M. (30 de Noviembre de 2021). *¿Cuál es el mejor aislante térmico? Guía de materiales para aislamiento*. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/aislamiento-y-humedad/materiales-aislamiento-cual-mejor-aislante-termico.html#poliuretano>
- Equipos, E. (Enero de 2024). *Ventilador centrífugo T2 150cfm*. Obtenido de <https://exhibirequipos.com/producto/motoventilador-turbina-t2/>
- Espinoza, V., & Menjivar, A. (2018). *Diseño, Construcción Y Caracterización De Secador De Granos De Café, Utilizando La Energía Térmica Contenida En Fluidos Geotérmicos*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Forson, F. K., & Nazha, M. A. (2007). *Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb*. Kusami: Kwame Nkrumah University of Science and Technology.
- Giler, M., & Romano, P. (2017). *Diseño y construcción de un secador solar indirecto de arena aplicada en sandblasting para la empresa SYMEP S.A*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- K.S., T., & Mutai, E. (2014). *Design and Evaluation of Solar Grain Dryer with a Back-up Heater*. Nairobi: Maxwell Scientific Organization.
- Levit, K., & Destinations. (s.f.). *Trabajador rastrillar los granos de café en una plantación de café. Trabajador rastrillar los granos de café en una plantación de café*. Design Pics Inc / Alamy Foto de stock, Zacapa.
- Map, T. (Noviembre de 2023). *Mapa topográfico del Ecuador*. Obtenido de <https://es-ec.topographic-map.com/map-m3ggp/Ecuador/?center=0.15532%2C-78.8632&zoom=14>
- Marchena, H., & Vicente, V. (2020). *Repositorio Universidad Nacional de Jaén*. Obtenido de Universidad Nacional de Jaén: [http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/220/1/Marchena\\_QHH\\_Vicente\\_VJW.pdf](http://m.repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/220/1/Marchena_QHH_Vicente_VJW.pdf)
- Mayayo, J. (2012). *Materiales de Cambio de Fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

- Méndez, A. (2019). *Almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase para su uso en un sistema de aislamiento térmico automotriz*. Quito: Universidad Internacional SEK.
- Mezquitillo, C. R. (Marzo de 2014). *Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Obtenido de Desempeño de un Deshidratador Solar Indirecto para el Deshidratado de Tomate Saladette: <https://iydt.files.wordpress.com/2015/01/01-desempec3b1o-de-un-deshidratador-solar-indirecto-para-el-deshidratado-de-tomate-saladette-docx.pdf>
- Onkar, A. B., & Vinkel, K. A. (2019). *Selection of phase change material for solar thermal storage application: a comparative study*. Sonipat: The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.
- Pacto, G. P. (2021). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Pacto 2019 - 2023*. Quito: Gestnova, Cía. Ltda.
- Palomo, M. (2017). *Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Quishpe, K. (2019). Diseño y construcción de un acumulador solar térmico mediante cambio de fase para optimizar el secado en un secador solar. *Investigación UNSCH*.
- 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*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Ruiz, L. (2016). *Diseño de un secador de bandejas para la deshidratación del plátano en la parroquia Veracruz del cantón Pastaza*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Sánchez, V., & Yuquilema, W. (2020). *Diseño de un secador solar para productos agrícolas*. Guayaquil: Escuela Politécnica del Litoral.
- Sharma, M. (2020). A Review on Developments in Solar Portable Dryers. En M. Sharma. Alwar: Northern Institute of Engineering Technical.
- Silvestre, M. F. (2020). *Efectos de métodos de beneficio del café robusta (Coffea canephora P.) en la calidad de la taza*. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena.

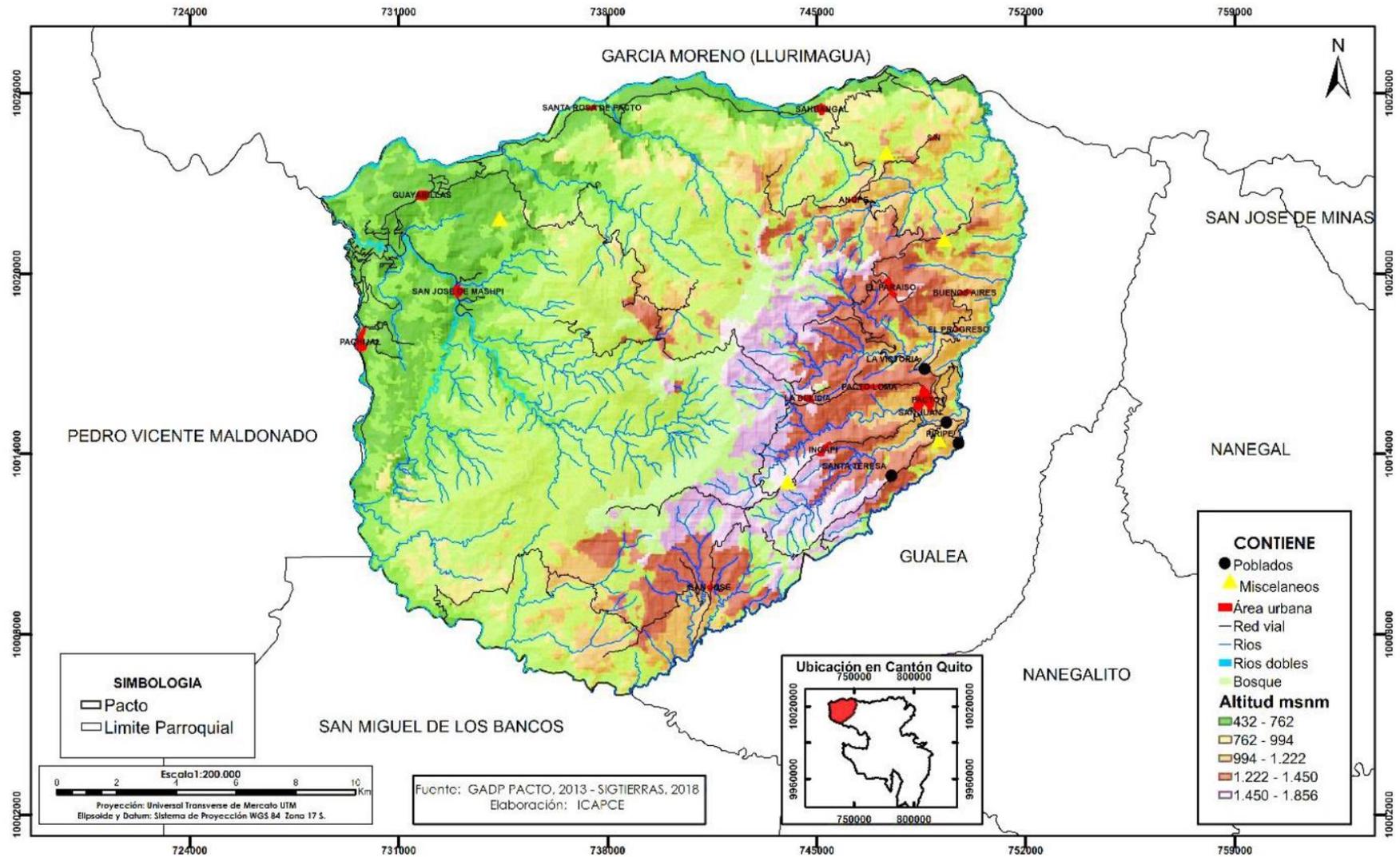
- Vaca, D., & Ordoñez, F. (2020). *Mapa Solar del Ecuador 2019*. Obtenido de Scinergy Reseaching Alternative Energy: [https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa\\_Solar\\_del\\_Ecuador\\_2019.pdf](https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf)
- Vera, V., & Yugsi, F. (2015). *Diseño de dos prototipos para el secado de café para el Noroccidente de Pichincha*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Vergara, J. (27 de Julio de 2020). *Partes del fruto del café*. Obtenido de <https://www.inceptioncoffee.com/partes-del-fruto-de-cafe/>

# ANEXOS

## ANEXO I. Mapa topográfico del noroccidente de Pichincha.



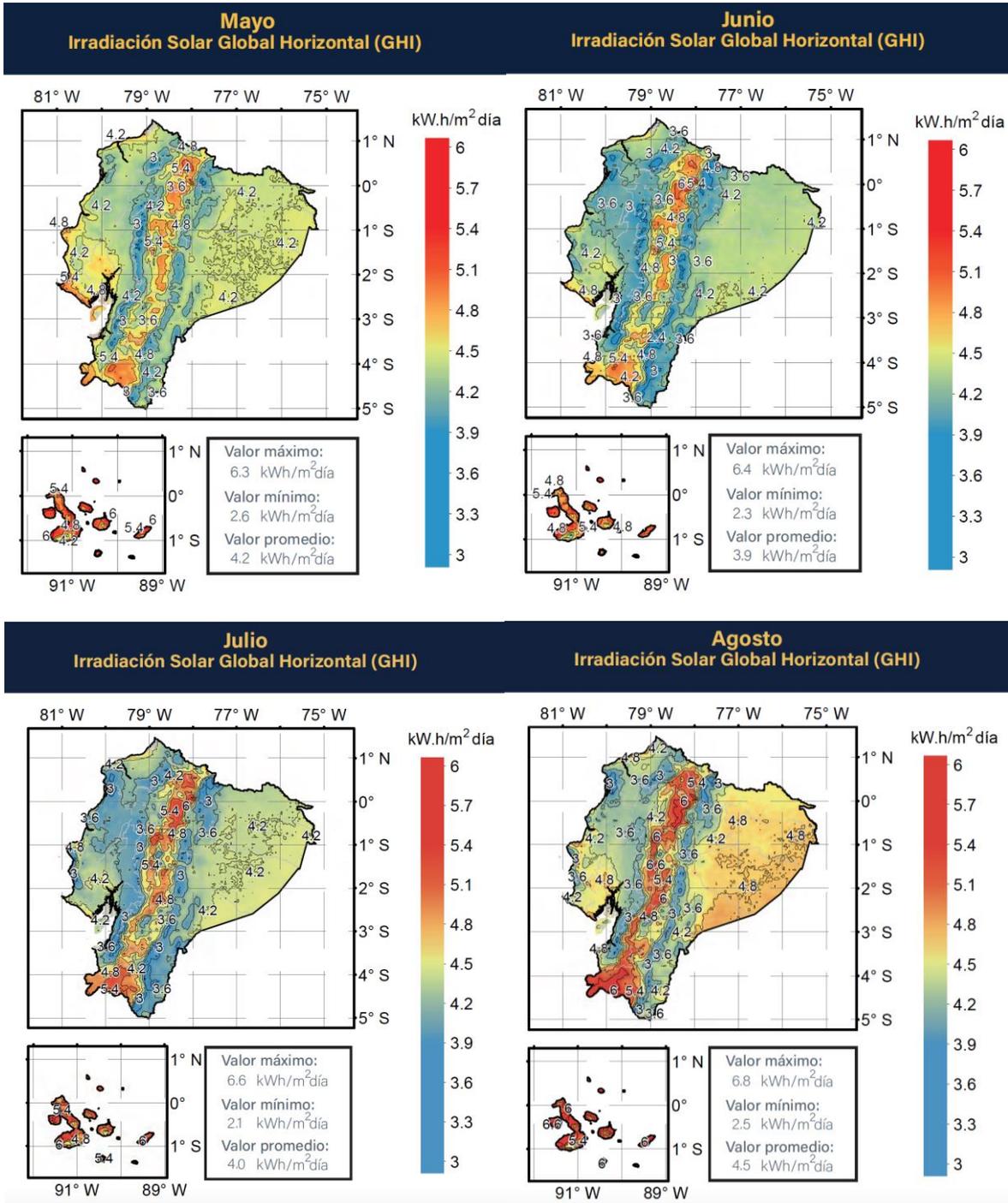
## ANEXO II. Mapa topográfico de la parroquia Pacto.



**ANEXO III.** Carga específica recomendada según el tipo de aparato.

Artefacto	Tipo de elemento	Intervalo de carga superficial sugerido (W/cm <sup>2</sup> )
Estufa	Elemento espiral al aire libre	4.5 - 6.0
Estufa	Barra tipo lápiz	6.0 - 9.5
Calentador de cinta	Elemento bobinado en mica	4.0 - 5.5
Tostadora	Elemento bobinado en mica	3.0 - 4.0
Convector	Elemento espiralado	3.5 - 4.5
Convector de acumulación	Elemento espiralado	1.5 - 2.5
Calefactor con ventilador	Elemento espiralado	9.0 - 15.0
Elemento de horno		8.0 - 12.0
Elemento de parrilla		15.0 - 20.0
Placa calentadora	Elemento tubular envainado	17.0 - 22.0
Calentador de inmersión en agua		25.0 - 35.0
Elemento de hervidor		35.0 - 50.0

# ANEXO IV. Mapa solar mensual del Ecuador 2019.



## ANEXO V. Propiedades del aire a presión 1 atm.

**TABLA A-15**

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

## ANEXO VI. Código Matlab del deshidratador híbrido solar y eléctrico.

```
%ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL%
%MODELO MATEMÁTICO DESHIDRATADOR SOLAR HÍBRIDO%

%Dimensionamiento del colector solar%

clc
clear all;

%Parámetros Iniciales%

Tamb=294; %temperatura ambiente [K]
Tsec=323; %temperatura secado [K]
Cpaire=1008; %calor específico aire a condiciones locales [J/kg.K]
mas=0.038; %flujo másico requerido para secado [kg/s]
emt=0.85; %emisividad para placas metálicas
evr=0.9; %emisividad del vidrio
tvr=0.88; %transmitancia del vidrio
abtm=0.95; %absortividad placas metálicas
pdif=0.16; %refractancia difusa
Ir=840; %irradiancia solar [W/m2]
sigma=5.67E-8; %constante de Stefan Boltzman [W/m2.K4]
vvent=2; %velocidad del viento local [m/s]
kais=0.035; %coeficiente de conductividad térmica de aislante, lana de vidrio
[W/m.K]
eais=0.035; %espesor aislante [m]
wcole=1.2; %ancho colector [m]
hcole=0.04; %altura colector [m]

%Variables Iniciales%

he=2.8+(3*vvent); %coeficiente convección externo aire
Tcielo=0.0552*(Tamb^1.5); %temperatura del cielo [K]
Tm=(Tamb+Tsec)/2; %temperatura media del aire dentro del colector [K]
kaire=(0.03743+((0.00079889)*Tm)-((0.00000016889)*(Tm^2)))*0.1; %coeficiente
conductividad aire [W/m.K]
uaire=(0.000001467)*(Tamb^1.5)/(107.87+Tamb); %viscosidad dinámica aire
[N.s/m2]
tvrabt=tvr*abtm/(1-(1-abtm)*pdif); %factor de refractancia
qrad=Ir*tvrabt; %calor de irradiación solar [W/m2]
Nu=7.54; %Nusselt flujo laminar desarrollado

%Temperatura superficial exterior de la cámara de secado%

Tsex=Tamb+5; %temperatura superficial exterior asumida inicialmente 5 grados
mayor a la ambiente [K]
Hcam=0.45; %altura cámara de secado [m]
Lcam=1.26; %longitud cámara de secado [m]
Acam=0.60; %longitud cámara de secado [m]
einox=0.001; %espesor del acero inoxidable de la cámara de secado [m]
eaisc=0.040; %espesor del aislante térmico de la cámara de secado [m]
eacer=0.002; %espesor del acero negro de la cámara de secado [m]
kinox=16.3; %conductividad térmica acero inoxidable [W/m.K]
kaisc=0.035; %conductividad térmica lana de vidrio [W/m.K]
kacer=58.7; %conductividad térmica acero negro [W/m.K]
```

```

Atcs=2*((Hcam*Acam)+(Hcam*Lcam)+(Acam*Lcam)); %área total de la cámara de
secado [m2]
VTsex=[];
Vhr=[];

for m=1:5
    hr=emt*sigma*(Tsex+Tamb)*((Tsex^2)+(Tamb^2));
    Qperd=Atcs*((Tsec-
Tamb)/((einox/kinox)+(eaisc/kaisc)+(eacer/kacer)+(1/(he+hr))));
    Tsex=Tsec-((Qperd/Atcs)*((einox/kinox)+(eaisc/kaisc)+(eacer/kacer)));
    Vhr(m)=hr;
    VTsex(m)=Tsex;
end

thrqt=table(Vhr',VTsex')

%Dimensionamiento del colector%

Vhcole=[];
VLcole=[];

for j=1:50
    Dh=(2*wcole*hcole)/(wcole+hcole); %diámetro hidráulico colector [m]
    Re=2*mas/(uair*(wcole+hcole)); %Reynolds

    %Iteraciones del modelo matemático%
    Tc=(Tm+Tamb)/2;
    Tp=Tsec;
    for i=1:11
        hri=(((Tp^2)+(Tc^2))*(Tp+Tc)*sigma)/((1/evr)+(1/emt)-1); %coeficiente
radiación interno [W/m2.K]
        hre=(evr*sigma*((Tc^4)-(Tcielo^4)))/(Tc-Tamb); %coeficiente radiación
externo aire [W/m2.K]
        hi=Nu*kair/Dh; %coeficiente conveccion interno [W/m2.K]
        Upas=(hre+he)*(hri+hi)/(hri+hre+hi+he); %coeficiente global pérdidas
superiores [W/m2.K]
        Upai=(he*kais)/((eais*he)+kais); %coeficiente global pérdidas
inferiores [W/m2.K]
        Tc=((Tp*(hi+hri)+(Tamb*(he+hre)))/(hri+hre+hi+he); %temperatura
cubierta en i iteración [K]
        Tp=(grad+(hi*Tm)+(Upas*Tamb)+(Upai*Tamb))/(hi+Upas+Upai); %temperatura
placa-módulo en i iteración [K]
    end
    Tpm=(Tamb+Tp)/2;
    Lcole=(mas*Cpaire*(Tsec-Tamb))/(wcole*((Ir*tvrabt)-(Upas+Upai)*(Tpm-
Tamb))); %longitud del colector [m]
    Vhcole(j)=hcole;
    VLcole(j)=Lcole;
    hcole=hcole+0.005;
end
figure(1)
plot(Vhcole,VLcole)
title('Longitud VS Altura del colector')
xlabel('Altura del colector [m]')
ylabel('Longitud del colector [m]')

% Iteraciones para determinar la temperatura de placa para una altura del
colector 0.005 [m] %

```

```

%Condiciones generales%

hcole=0.055; %altura colector [m]
Dh=(2*wcole*hcole)/(wcole+hcole); %diámetro hidráulico colector [m]
Re=2*mas/(uair*(wcole+hcole)); %Reynolds

Tc=(Tm+Tamb)/2;
Tp=Tsec;
VTc=[];
VTp=[];

for i=1:11
    hri=(((Tp^2)+(Tc^2))*(Tp+Tc)*sigma)/((1/evr)+(1/emt)-1); %coeficiente
radiación interno [W/m2.K]
    hre=(evr*sigma*((Tc^4)-(Tcielo^4)))/(Tc-Tamb); %coeficiente radiación
externo aire [W/m2.K]
    hi=Nu*kair/Dh; %coeficiente conveccion interno [W/m2.K]
    Upas=(hre+he)*(hri+hi)/(hri+hre+hi+he); %coeficiente global pérdidas
superiores [W/m2.K]
    Upai=(he*kais)/((eais*he)+kais); %coeficiente global pérdidas inferiores
[W/m2.K]
    Tc=((Tp*(hi+hri)+(Tamb*(he+hre)))/(hri+hre+hi+he); %temperatura cubierta
en i iteración [K]
    Tp=(grad+(hi*Tm)+(Upas*Tamb)+(Upai*Tamb))/(hi+Upas+Upai); %temperatura
placa-módu en i iteración [K]
    VTc(i)=Tc;
    VTp(i)=Tp;
end

%Tiempo en alcanzar la máxima temperatura el material PCM según la cantidad a
usar%

Acole=wcole*Lcole; %área del colector [m2]
Cppcm=1.16E3; %calor específico promedio PCM [J/kg.K]
mpcm=0; %masa de PCM [kg]
t = linspace(0,18000); %vector del tiempo [s]
Mm=[];

for i=1:15
    mpcm=mpcm+5;
    DF=Acole*(Ir*tvrbt+hi*Tm+(Upai+Upas)*Tamb)/(Cppcm*mpcm); %factores de
reemplazo
    FF=Acole*(hi+Upai+Upas)/(Cppcm*mpcm); %factores de reemplazo
    Tpcm=Tamb*(exp(-FF*t))+(DF/FF)*(1-exp(-FF*t)); %tiempo para una Tp igual a
363.5 [K]
    Mm(i)=mpcm;
    figure (2)
    plot(t,Tpcm)
    title('Tiempo de estabilización de la temperatura para diferentes
cantidades de masa de PCM')
    xlabel('Tiempo [s]')
    ylabel('Temperatura de placa [K]')
    legend
    hold on
end

%Calor almacenado durante el tiempo de brillo solar para 40 kg de PCM%

```

```

mpcm=40; % masa de PCM [kg]
Tfpcm=329.6; %temperatura de fusión PCM [K]
cppcms=2.1; % calor específico PCM solido [kJ/kg.K]
clpcm=383.87; %calor latente de fusión PCM
cppcml=1.16; % calor específico PCM líquido [kJ/kg.K]
Qpcm=mpcm*(cppcms*(Tfpcm-Tamb)+clpcm+cppcml*(Tp-Tfpcm)) %calor almacenado [W]

% MODELO ESPACIO-ESTADOS %

syms t s

mcps= 11.36; %masa de café pergamino seco [kg]
Wi=55; % humedad inicial café base húmeda [%]
Wf=12; % humedad inicial café base húmeda [%]
mcph= 1.92*mcps; %masa de café pergamino húmedo [kg]
Cpcph=8430; % calor específico café pergamino húmedo [J/kg.K]

maeva=(Wi*mcph/100)-(Wf*mcps/100); % masa de agua evaporada [kg]
Qsec=(Ir*tvrbt-(Upas+Upai)*(Tpm-Tamb))*Acole; %calor recibido del colector [W]
tmc=mcph*Cpcph;
deltatemp=29; %variación de temperatura que se requiere mantener [K]

A=[-(mas*Cpaire/tmc)-(Qperd/(tmc*(Tsec-Tamb))) 0;0 0];
B=[1/tmc 0;0 maeva*(100-Wf)/((maeva+mcps)^2)];
C=[1 0;0 1];
D=[0 0;0 0];

planta=ss(A,B,C,D);
GP=tf(planta)

%LAZO ABIERTO%
GP1=GP(1,1);
figure(3)
step(Qsec*GP1)
title('Respuesta Lazo abierto - Escalón Delta de Temperatura')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Delta de temperatura [K]')

GP2=GP(2,2);
figure(4)
step(mcph*GP2);
title('Respuesta Lazo abierto - Escalón Razón de Humedad')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Variación de la razón de humedad')

%LAZO CERRADO%

[Gc,info]=pidtune(GP1,'PID');
figure(5)
H=feedback(GP1*Gc,1);
step(deltatemp*H);
title('Respuesta Lazo cerrado - Escalón Delta de temperatura')
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Delta de temperatura [K]')

[Gc,info]=pidtune(GP2,'PID');
figure(6)

```

```
L=feedback(GP2*Gc,1);  
step(1*L);  
title('Respuesta Lazo cerrado - Escalón Razón de Humedad')  
xlabel('Tiempo [s]')  
ylabel('Variación de la razón de humedad')
```