



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO
POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN
PERGAMINO (*coffea arabica*)**

Enmer Arnulfo Marroquín Juárez

Asesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO
POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN
PERGAMINO (*coffea arabica*)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ENMER ARNULFO MARROQUÍN JUÁREZ
ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Edmundo Monroy Benítez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO
POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN
PERGAMINO (*coffea arabica*)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de noviembre de 2018.

Enmer Arnulfo Marroquín Juárez

Guatemala 29 de enero de 2020

Ingeniero
William Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN PERGAMINO (*Coffea arabica*)", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Enmer Arnulfo Marroquín Juárez, quien se identifica con el registro académico 2013-14389 y con el CUI 1997 64018 0411.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Mauricio Valentino Rivera Tello
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 2089



Mauricio Valentino
Rivera Tello
INGENIERO QUIMICO
Colegiado. No. 2089



Guatemala, 13 de marzo de 2020.
 Ref. EIQ.TG-IF.014.2020.

Ingeniero
 Williams Guillermo Álvarez Mejía
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **075-2018**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Enmer Arnulfo Marroquín Juárez**.
 Identificado con número de carné: **1997640180411**.
 Identificado con registro académico: **201314389**.
 Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
 En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO
 UTILIZADO POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL
 GRANO DE CAFÉ EN PERGAMINO (Coffea arábica)**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Mauricio Valentino Rivera Tello, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Otto Raúl De León De Paz
 profesional de la Ingeniería Química
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

OTTO RAÚL DE LEÓN DE PAZ
 INGENIERO QUÍMICO
 COL. # 229
 CIQG





Guatemala, 23 de noviembre de 2020.

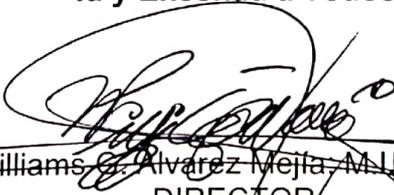
Ref. EIQ.322.2020

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN PERGAMINO (coffea arabica)** del(la) estudiante Enmer Arnulfo Marroquín Juárez, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Mejia MLO
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/mpea



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 424.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO MECÁNICO UTILIZADO POR LA COOPERATIVA ACATENANGO R.L. EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ EN PERGAMINO (*coffea arabica*)**, presentado por el estudiante universitario: **Enmer Arnulfo Marroquín Juárez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser fuente de vida, amor, fortaleza e inspiración para luchar y alcanzar mis objetivos.
- Mis padres** Arnulfo Marroquín Guerra y Elva Juárez Santizo por ser ejemplo de trabajo y lucha incansable, brindando lo mejor de sí mismos para el progreso de su familia.
- Mi esposa** Cristina Zamora Alva por su amor incondicional y excelente compañía.
- Mis hijos** Enmer Alexis y Cristina Montserrat Marroquín por ser la fuerza motriz que me impulsa a seguir adelante, por ser el principal motivo de mis alegrías.
- Mis hermanos** Uber, Melva, Wagner y Elder Marroquín por su eterna amistad, sin prejuicios y sin intereses.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme la vida y dotarme con la capacidad de pensar y razonar, además, por hace posible la adquisición de los medios y recursos necesarios para culminar con mi carrera universitaria.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios que al abrir sus puertas me brindó la oportunidad de formarme académicamente.
Facultad de Ingeniería	Por formarme como profesional, organizando y sintetizando el proceso académico y administrativo.
Escuela de Ingeniería Química	Por proporcionar los conocimientos específicos y herramientas necesarias a mi carrera profesional.
Mis padres y hermanos	Por su apoyo moral.
Mi esposa	Por su paciencia y apoyo moral ante diversidad de situaciones.
Ing. Mauricio Rivera Tello	Por su asesoría y tiempo invertido en la realización del presente proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. El café en Guatemala	1
1.2. Cooperativa Acatenango	2
1.3. Antecedentes generales.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Especies y variedades de café en Guatemala.....	7
2.2. Variedades de café en Acatenango.....	9
2.3. Desechado de materiales sólidos.....	9
2.4. Generalidades del secado de sólidos.....	9
2.5. Cinética de secado	11
2.5.1. Periodo de velocidad contante.....	12
2.5.2. Periodo de velocidad decreciente.....	12
2.6. Desección del grano de café	12
2.6.1. Métodos para el secado de café.....	13
2.6.1.1. Secado en patio.....	13
2.6.1.2. Secado mecánico	15

2.7.	Secado de café por lotes (secado discontinuo).....	15
2.8.	Sistema de secado de la Cooperativa Acatenango.....	15
2.8.1.	Secadores rotatorios tipo guardiolas	15
2.8.2.	Ventiladores	17
2.8.3.	Intercambiadores de calor	18
2.8.4.	Caldera.....	18
2.8.5.	Equipo de transporte	20
2.9.	Fuente de energía	20
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	23
3.1.	Variables	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	25
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	25
3.4.1.	Materia prima	26
3.4.2.	Equipo de protección personal.....	26
3.4.3.	Herramientas de medición.....	26
3.4.4.	Elementos del sistema de secado.....	26
3.4.5.	Equipo de escritorio.....	26
3.4.6.	Otros materiales	27
3.5.	Técnica cuantitativa.....	27
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	27
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	28
3.8.	Análisis estadístico.....	31
4.	RESULTADOS.....	39
4.1.	Caracterización del curso de secado	39
4.2.	Consumo energético	44

4.3.	Eficiencia térmica	45
4.4.	Costo energético	46
4.5.	Tiempo óptimo de secado	46
4.6.	Análisis estadístico	47
4.6.1.	Análisis de varianza	47
4.6.2.	Prueba T-Student	48
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	49
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICE.....	63
	ANEXOS	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre	11
2.	Patio para secado de café pergamino.....	14
3.	Secador rotatorio tipo guardiola	16
4.	Ventilador centrífugo	17
5.	Intercambiador de calor.....	18
6.	Caldera Engeman	19
7.	Distribución normal de probabilidad	36
8.	Comportamiento de la humedad relativa del grano de café en pergamino en función del tiempo	40
9.	Comportamiento del contenido de humedad del grano de café en pergamino, en base húmeda, en función del tiempo.....	41
10.	Comportamiento del contenido de humedad del grano de café en pergamino, en base seca, en función del tiempo	42
11.	Comportamiento de la velocidad de secado del grano de café en pergamino en función del tiempo	43
12.	Comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad.....	44

TABLAS

I.	Composición química de la leña en base húmeda.....	21
II.	Datos tecnológicos de la gravilea robusta.....	22

III.	Clasificación de variables que influyen en la determinación de las curvas de secado.....	23
IV.	Registro de variables para conocer la eficiencia térmica del sistema de secado	24
V.	Registro de las variables que definen el consumo energético	24
VI.	Recolección y ordenamiento de la información	27
VII.	Tabulación de la información	29
VIII.	Análisis de varianza (ANOVA)	32
IX.	Consumo energético demandado en el secado de un lote de café en pergamino	45
X.	Eficiencia térmica del sistema de secado	45
XI.	Costo energético de la operación del sistema de secado en el secado de un lote de café en pergamino	46
XII.	Tiempo óptimo de secado.....	47
XIII.	Resultados del análisis de varianza.....	47
XIV.	Resultados de la prueba de T-Student	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Q	Calor
c_{pL}	Calor específico del agua líquida
c_{ps}	Calor específico del grano de café
c_{pv}	Calor específico del vapor de agua
λ	Calor latente de vaporización
X_{bh}	Contenido de humedad en base húmeda
X	Contenido de humedad en base seca
X_b	Contenido de humedad final
X_a	Contenido de humedad inicial
ρ	Densidad
s	Desviación estándar
D	Diámetro
η	Eficiencia
E	Energía
F	Estadístico de prueba de Fisher
°C	Grado Celsius
°F	Grado Fahrenheit
\bar{X}	Gran media
H₀	Hipótesis nula
H₁	Hipótesis alterna
h	Hora

W	Humedad específica
HR	Humedad relativa
kJ	Kilojulio
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
L	Longitud
L_s	Masa de pergamino seco
M	Masa
\bar{x}	Media aritmética muestral
μ	Media aritmética poblacional
M	Metro
α	Nivel de significancia
n	Número de observaciones
n_{ij}	Observación de fila i y columna j
n_i	Observación i
PC	Poder calorífico
P_{int}	Potencia de entrada
P_{out}	Potencia de salida
s	Segundo
Σ	Sumatoria
T	Temperatura
T_{bh}	Temperatura de bulbo húmedo
T_{sb}	Temperatura final del grano
T_{va}	Temperatura final del vapor
T_{sa}	Temperatura inicial del grano
T_v	Temperatura de vaporización
t	Tiempo
t	t-Student
Vr	Vara

R

Velocidad de secado

V

Volumen

GLOSARIO

Análisis de varianza	Análisis estadístico que permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias significativas o, por el contrario, si pueden suponerse que sus medias poblacionales no difieren.
Café pergamino	Producto resultante del proceso de despulpado y lavado del café cereza en un beneficio húmedo.
Caldera	Dispositivo o equipo metálico cerrado destinado a producir vapor o calentar agua mediante la acción de calor a una temperatura y presión mayores que las del ambiente.
Calor específico	Energía que necesita por kilogramo un cuerpo para elevar su temperatura en 1 °C.
Calor latente	Cantidad de energía requerida por una sustancia para cambiar de un estado físico a otro.
Carta psicrométrica	Gráfica representativa de las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua.
Contenido de humedad	Cantidad de agua contenida en un material.

Densidad	Magnitud escalar que relaciona la cantidad de materia contenida en una unidad de volumen.
Eficiencia térmica	Relación entre el calor utilizado en la evaporación y la energía térmica suministrada al sistema de evaporación
Guardiola	Secador cilíndrico rotatorio con varias cámaras donde se introduce el café que se seca por contacto con aire caliente.
Humedad específica	Cantidad de agua presente en el aire por unidad en masa de aire seco.
Humedad relativa	Relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener a esa temperatura.
Interpolación	Método numérico utilizado para determinar un valor deseado que se encuentra dentro de un intervalo cuyos extremos son conocidos.
Lote	Determinada unidad de medida de fabricación de un conjunto que se planifica y se fabrica con referencia a un número.
Poder calorífico	Cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de combustión.

SCE	Suma de cuadrados del error.
SCT	Suma de cuadrados totales.
SCTR	Suma de cuadrados de tratamientos.
Tarea	Unidad de medida para expresar cantidad de leña.
Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura estacionaria que alcanza una pequeña masa de líquido sumergida, en condiciones adiabáticas, en una corriente de aire.
Temperatura de bulbo seco	Temperatura del aire seco y vapor de agua en las condiciones del sistema.
Termohigrómetro	Instrumento que se utiliza para la medición de a humedad relativa y temperatura del ambiente simultáneamente.

RESUMEN

El presente estudio se realizó con el propósito de evaluar el sistema de secado mecánico utilizado por la Cooperativa Acatenango R.L. en el proceso de secado del grano de café pergamino. El diseño experimental utilizado para la recolección de datos consistió en lo siguiente: utilizando un termohigrómetro se registró las condiciones de humedad y temperatura del ambiente en intervalos de una hora; con el uso de un termómetro bimetálico integrado al sistema de secado. Inmediatamente después del intercambiador de calor, se registró la temperatura del aire caliente que ingresa a la guardiola, de igual manera a intervalos de una hora.

Utilizando un medidor de humedad de café y un termómetro, se monitoreo de manera periódica la humedad y temperatura de muestras extraídas de una de las seis guardiolas que componen el sistema de secado de la Cooperativa Acatenango. Con el uso de un segundo termómetro integrado al sistema de secado, en la superficie de la guardiola, se monitoreó la temperatura del aire que sale de la guardiola como producto del proceso de secado.

Mediante la manipulación de los datos experimentales obtenidos se caracterizó el curso de secamiento del grano de café a través de la construcción de las correspondientes curvas de secado. Con las características de placa de los motores que componen el sistema y el consumo de leña se cuantificó la demanda energética y el costo monetario que implica el secado de un lote de café pergamino para la Cooperativa. Utilizando los datos del grano de café recabados en el experimento y sus propiedades se calculó la eficiencia térmica del sistema de secado como la relación entre la energía demandada para secar

el grano de café y la energía suministrada por la cantidad de leña utilizada. Como parte final de la evaluación se determinó la calidad del producto final del proceso de secado verificando la homogeneidad de la humedad del grano en diferentes muestras de una misma guardiola y en muestras de las diferentes guardiolas, así como que la humedad final del grano esté dentro de los límites de especificación.

Se verificó que, en las condiciones del experimento, en las primeras 20 horas el secado se desarrolla en régimen de velocidad constante, el tiempo óptimo para llevar el grano a las condiciones deseadas es de 71,2 horas y la eficiencia térmica del sistema es de 11,2 %. En cuanto a las condiciones del producto final se encontró que la humedad del grano cumple con los requisitos de especificación y mediante el análisis estadístico se comprobó que no existe diferencia significativa entre la humedad del grano en las diferentes guardiolas.

OBJETIVOS

General

Evaluar la operación del sistema de secado mecánico utilizado por la Cooperativa Acatenango R.L. en el secado del grano de café en pergamino (*coffea arabica*).

Específicos

1. Evaluar el curso de secamiento del grano de café pergamino en función del tiempo y en función del contenido de humedad del grano de café.
2. Cuantificar el consumo energético que demanda el proceso de secado mecánico del grano de café pergamino.
3. Calcular el costo económico que implica la operación del sistema de secado mecánico del grano de café en pergamino.
4. Determinar la eficiencia térmica del sistema de secado en términos de la energía del combustible suministrada al sistema.
5. Calcular el tiempo de residencia del grano de café en pergamino dentro de las guardiolas para lograr en el grano una humedad del 12 % en base húmeda.

6. Determinar si existe diferencia significativa de humedad en el grano de café pergamino obtenido en cada una de las seis guardiolas finalizada la operación de secado.

7. Caracterizar las condiciones del grano de café en pergamino finalizada la operación de secado.

HIPÓTESIS

El proceso de secado mecánico del grano de café en pergamino utilizado por la Cooperativa Acatenango R.L. es uniforme y consistente en todo el sistema, obteniendo de esta forma igual humedad en el grano producto independientemente de la guardiola; además de obtener la calidad requerida, 12 % de humedad en base húmeda, en el tiempo de duración de secado estipulado para el proceso, considerando que el análisis del producto se realiza organolépticamente (forma visual y táctil).

Hipótesis estadística 1

Hipótesis nula 1 (Ho,1):

La humedad del grano de café pergamino, como producto final del proceso de secado mecánico, no varía significativamente entre guardiolas.

$$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

Hipótesis alternativa 1 (HI,1):

La humedad del grano de café pergamino, como producto final del proceso de secado mecánico, varía significativamente entre guardiolas.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_n$$

Hipótesis estadística 2

Hipótesis nula 2 (Ho,2):

La humedad del grano de café en pergamino, obtenido como producto al final del proceso de secado, es del 12 % (base húmeda).

$$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

Hipótesis alternativa 2 (H1,2):

La humedad del grano de café pergamino, como producto final del proceso de secado mecánico, varía significativamente entre guardiolas.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_n$$

INTRODUCCIÓN

El secado es la operación unitaria de separación mediante el cual se remueve agua o algún otro compuesto volátil por evaporación de un producto sólido deseado.¹ Esta operación involucra la presencia de fenómenos de transferencia de masa y transferencia de calor simultáneamente; para los cuales se requiere el consumo de cantidades grandes de energía. La energía utilizada en la operación de secado de un sólido es principalmente utilizada para calentar el fluido (aire) de secado y por medio de este evaporar el agua del producto sólido.

En la industria del café, la operación del secado es una etapa muy crítica del proceso, de esta depende, en gran medida, la calidad del producto y con ello su aceptación en el mercado.

Para llevar a cabo la operación de secado de café pergamino se utilizan generalmente dos métodos: el secado natural al sol o secado a patios y el secado mecánico. El secado mecánico se realiza mediante el uso de equipos mecánicos que aceleran el proceso de secado reduciendo tiempos respecto del secado natural.

Uno de los equipos mecánicos más comunes empleados para el secado de café pergamino son las guardiolas, que son secadores cilíndricos rotatorios que operan en régimen continuo o por lotes. Los secadores rotatorios, guardiolas, son de uso común en el secado de café pergamino en los beneficios

¹ GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. p. 579.

húmedos, ya que permiten reducir los tiempos de secado respecto de otro tipo de secador.

En la región cafetalera del municipio de Acatenango del departamento de Chimaltenango se encuentra ubicada la Cooperativa Acatenango R.L. Dicha Cooperativa cuenta con un beneficio húmedo en el cual se realiza la manipulación y preparación del grano de café hasta su presentación final como producto envasado o pergamino oro, según se requiera.

En las instalaciones de la Cooperativa se encuentra instalado un sistema de secado que consiste en un conjunto de seis secadores cilíndricos rotatorios, tipo guardiola, que se utiliza para el secado del grano de café en pergamino. El fluido utilizado para la desecación del grano es el aire del ambiente, el cual es calentado por un intercambiador de calor previo su ingreso a la guardiola. El agua utilizada en el intercambio de calor con el aire es calentada por una caldera que utiliza leña como combustible.

El proceso de secado de café pergamino en la Cooperativa Acatenango R.L. se realiza utilizando los métodos de secado natural en patios y el método mecánico que consta de un sistema de seis secadores rotatorios tipo guardiolas que opera en régimen por lotes.

A continuación, se presenta la evaluación del sistema de secado mecánico que se encuentra ubicado en la Cooperativa Acatenango. Como resultado de la evaluación se da a conocer el comportamiento del grano de café durante el proceso a través de las respectivas curvas de secado, de igual forma se muestra la determinación del consumo energético y costo del mismo demandado en el secado de un lote de producto. Como parte fundamental de la evaluación del sistema, se presenta la eficiencia térmica según la cual se

desarrolla el proceso; así también, se concluye sobre los resultados de calidad del producto mediante los métodos estadísticos de ANOVA (análisis de varianza a una vía) y T-Student para determinar las condiciones del producto final.

1. ANTECEDENTES

1.1. El café en Guatemala

El café tiene sus orígenes en Yemen, se cree que en este pueblo fue donde se descubrió y reconoció el efecto energizante de los granos de la planta de café, pero fue en Arabia donde los granos de café fueron tostados y molidos por primera vez en una forma similar a como son preparados en la actualidad.

Las primeras plantaciones de café en Guatemala fueron traídas por frailes jesuitas a mediados de 1700, quienes lo trajeron como planta ornamental para sus jardines en los conventos de Santiago de los Caballeros (actualmente La Antigua Guatemala). Después del terremoto de Santa Marta de 1773, se perdió mucha plantación de café, las plantaciones que sobraron se trasladaron a la posterior capital en el Valle de la Ermita (actualmente ciudad de Guatemala).

En 1800, una plaga de langostas devasta las plantaciones de añil, que era uno de los dos cultivos de exportación de los cuales, la economía dependía, lo cual forzó al gobierno a buscar nuevas exportaciones posibles, a raíz de esto inicia la producción del café como producto de forma masiva.

A partir de 1860, surgen las fincas grandes dedicadas al cultivo del cafeto en los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez, Suchitepéquez, Retalhuleu, Escuintla, Alta Verapaz, Jutiapa y Quetzaltenango, donde cobra particular renombre el café de Costa Cuca. En 1865, el café de Guatemala se hace representar en la exhibición Internacional de París. En 1871, el cultivo del cafeto era ya un negocio lucrativo; se constituyó en el renglón principal de la

economía de la nación y pasó a ocupar el primer lugar entre los productos de exportación.

1.2. Cooperativa Acatenango

El café en Acatenango inicia a cultivarse en la década de 1880. El grano es cosechado a la sombra a alturas que alcanzan los 2 000 metros.

La cooperativa Acatenango R.L. tiene sus inicios en 1966 por iniciativa de 27 caficultores.

En 1970 se realiza la construcción del beneficio húmedo e inicia la comercialización de su café en pergamino.

En 2010 se realiza la adaptación del sistema de secado mecánico que utilizan para el secado del grano de café en pergamino en la actualidad.

1.3. Antecedentes generales

El secado de café es una operación fundamental, surge por la necesidad que se tiene de preservar el producto sin que este sea afectado por agentes externos o cambios radicales en las propiedades que afecten su calidad.

En épocas remotas la operación del secamiento de café se realizaba únicamente en grandes patios de cemento o ladrillo al sol, esta actividad como tal se veía desfavorecida por las condiciones climáticas del tiempo. A raíz de estas desventajas y necesidades, se fueron creando nuevos métodos que permitieran realizar esta actividad de forma más controlada y eficiente. Uno de estos métodos es el secado de café por medios mecánicos, utilizando

guardiolas que son cilindros rotatorios por los cuales se hace circular un flujo de aire caliente que permite extraer la humedad del café que se encuentra en el interior del cilindro.

Se ha realizado diversidad de estudios sobre el funcionamiento de este tipo de secadores que van desde el diseño para el secado de un sólido específico hasta evaluaciones del rendimiento de estos equipos en operación.

En 2017 en la universidad de San Carlos de Guatemala, Luis Fernando Chen García presentó como trabajo de graduación optando al grado de Ingeniero Químico un estudio sobre el desempeño de un secador rotatorio titulado *Calificación de la operación y desempeño de un secador rotatorio continuo, y optimización del secado con piedra pómez, para producción de agroquímicos granulares*, en el cual expone que la eficiencia térmica del equipo en el proceso de secado de la piedra pómez es de 71,26 %. Además, recomienda un reemplazo del aislamiento térmico para así disminuir las pérdidas de calor por radiación en el proceso.

En 2013, Yonatan David Pérez Zamora, presenta su trabajo de graduación titulado *Determinación experimental de la eficiencia de un secador de túnel rotatorio en proceso discontinuo utilizando grano de café tipo arábigo en pergamino*, que se desarrolló en la aldea el Teocinte, del municipio de Santa Cruz el Naranjo, Santa Rosa. En el cual expone secar por más tiempo al sol el grano de café antes de ingresar a la guardiola para así aumentar la eficiencia térmica del equipo de secado.

En 2010, Mario Ricardo Alarcón Meléndez presentó su trabajo de graduación titulado *Propuesta de un sistema de secado semi-automatizado de café*, para generar un proceso productivo y eficiente, en la Cooperativa

Acatenango, Acatenango, Chimaltenango, en Universidad de San Carlos de Guatemala; en el cual propone la implementación de un sistema de secado mecánico para la operación del secado del café en pergamino de la Cooperativa Acatenango, tal propuesta se compone de un sistema que consta de seis secadores rotatorios que operan por lotes, una caldera para proporcionar vapor de agua utilizado para el calentamiento del aire de secado.

En 2010, en la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Mario Ricardo Alarcón Meléndez presenta su trabajo de graduación titulado *Propuesta de un sistema de secado semi-automatizado de café, para generar un proceso productivo y eficiente, en la Cooperativa Acatenango, Acatenango, Chimaltenango*. En este trabajo se encuentran plasmadas cada una de las características de cada equipo que conforman el sistema de secado mecánico de la Cooperativa Acatenango, sistema propuesto a evaluación en el presente informe.

En 2008, en la revista Brasileira de Engenharia Agrícola y Ambiental en Brasil se publica el artículo Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino por los colaboradores de SECAFÈ. Alfonso Parra Coronado, Gonzalo Roa Mejía y Carlos E. Oliveros Tacson trabajaron en un programa de simulación que predice el comportamiento del secado del café pergamino y presentan la comparación del uso del programa con los datos experimentales.

En 2007, la Inga. Martha Angélica Calva Ramírez, en el Instituto Politécnico Nacional, presenta su trabajo de graduación titulado Comparación de eficiencia energética entre sistemas de secado horizontal y vertical, donde realiza una comparación de la operación entre estos dos sistemas, y que para

el caso de la evaporación de agua de un sólido la eficiencia en ambos secadores es la misma.

Entre otras investigaciones relacionadas se pueden mencionar las siguientes:

Para 1987, Carlos Eduardo Ayala Cruz, realizó una investigación sobre evaluación de una unidad de calentamiento de aire para el secado de café en Universidad de San Carlos de Guatemala.

1981, Tatiana del Rosario Solares Barboza; en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presenta su trabajo de graduación titulado *Determinación de curvas de humedad de café lavado*.

En 1981, Carlos Enrique Alonzo Mazariegos, en la Universidad de San Carlos de Guatemala presentó su trabajo de investigación con título *Estudio exploratorio de las modalidades de secamiento de café (coffea arabica)*.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala, en 1975, se realizó la investigación *Análisis de costos del beneficio húmedo de café en las fincas del municipio de La Reforma San Marcos* por Mario Enrique Aguilar Prado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Especies y variedades de café en Guatemala

La planta de café o cafeto, son arbustos que perteneces al género *Coffea*, de la familia de los rubiáceos. De las más de cien especies que pertenecen al género *Coffea*, se usan principalmente solo dos para la preparación de la bebida: *Coffea arábica* y *Coffea canephora*. La primera especie abarca casi tres cuartas partes de la producción mundial.

La especie *Coffea arábica*, o simplemente café arábigo produce un café fino y aromático y necesita un clima fresco.

La especie *Coffea canephora* o cafeto robusto ofrece una bebida rica en cafeína; fuerte y más ácido, usado principalmente para la fabricación de café soluble o instantáneo. Es más resistente que el café arábigo y se adapta bien a terrenos llanos, con rendimientos más elevados.

En Guatemala la especie de café predominante en el territorio es el *coffea arabica*, cuyas variedades más importantes son:

- **Typica o arábigo:** es la base a partir de la cual muchas variedades de café se han desarrollado. Tienen una forma cónica con tronco vertical y verticales secundarias que crecen con una ligera inclinación. Llega a medir de 3,5 a 4 metros de altura. Esta variedad tiene una producción muy baja, pero de excelente calidad.

- Bourbon: planta de café de baja producción. Las hojas son anchas y onduladas en los bordes; fruto relativamente pequeño y denso. Las cerezas maduran rápidamente y tienen mayor riesgo de caerse. Los mejores resultados se obtienen entre los 1 000 y 2 000 metros de altura.
- Mundo Novo: en un híbrido natural de Typica y Bourbon. Es una planta fuerte y resistente a las enfermedades. Tiene una alta producción, pero, tarda más tiempo en madurar. Se produce mejor en alturas entre 1 000 y 1 700 metros con precipitaciones anuales de 1 200 – 1 800 mm.
- Caturra: es una mutación de la variedad Bourbon, tiene una alta producción y buena calidad. Demanda una alta atención y fertilización. La planta es baja con un núcleo grueso y muchas ramas secundarias. Se produce mejor entre los 500 y 1 500 metros con precipitaciones anuales entre 2 500 – 3 500 mm. A mayor altitud aumenta la calidad, pero disminuye la producción.
- Catuaí: es una planta de café de alto rendimiento resultante de un cruce entre Mundo Novo y Caturra. El fruto no cae de la rama con facilidad, lo cual es favorable a zonas con fuertes vientos o lluvia. Requiere de suficiente cuidado y fertilización.
- Pache: es una mutación de la variedad Typica, presenta un porte bajo de 1,80 metros. Se caracteriza por el color café claro de sus hojas, producción alta, resistente al viento y buena adaptabilidad a suelos arcillosos².

² Anacefe. *Especies y variedades de café*. https://www.anacefe.org/glifos/index.php/Caficultura_VariedadesCafeto.

2.2. Variedades de café en Acatenango

Acatenango es la región cafetalera de más reciente reconocimiento. El grano es cosechado a la sombra a alturas que alcanzan los 2 000 metros, en suelos ricos en minerales. La taza de café de Acatenango presenta marcada acidez, aroma fragante, cuerpo balanceado y limpio, y un posgusto persistente.

La variedad de café en la región de Acatenango es diversa. Entre estas variedades se encuentran: Mundo Novo, Typica, Bourbon, Pache, Catuai, Caturra, Catimor y otros. Pero la mayoría de las plantaciones encontradas en la región son las variedades Caturra y Catuai, el resto son una minoría.

2.3. Desecado de materiales sólidos

El secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación. Por lo general, esta operación significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material, que casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.³ El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones, y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador pasa a ser empaquetado.

2.4. Generalidades del secado de sólidos

El desecado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos los cuales son: transferencia de calor para evaporar el líquido y transferencia de masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie. Los factores que regulan la velocidad de estos dos procesos

³ GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación* p. 579.

determinan la rapidez o índice de desecación.⁴ La transferencia de energía, en forma de calor, del fluido desecante al sólido húmedo puede ocurrir como el producto de los mecanismos de convección, conducción o radiación y en algunos casos puede ser una combinación de cualquiera de estos efectos.

La masa se transfiere durante la desecación en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas. El movimiento de humedad dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de sus características.

Los mecanismos de secado de transferencia de masa y calor son la forma en la cual el agua contenida en el sólido es extraída en forma de vapor con una corriente de aire caliente. El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material, cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera.

Entre los mecanismos de secado más comunes se citan la evaporación y la vaporización. En la evaporación se elimina el vapor formado por ebullición de una solución líquida de la que se obtiene una solución más concentrada,⁵ este fenómeno ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica que se produce por el aumento de la temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Por otro lado, en la vaporización el secado es generado por convección, pasando aire caliente sobre el sólido, el aire transfiere calor al sólido y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión de vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

⁴ ROBERT. Perry. *Manual del ingeniero químico*. p. 1844.

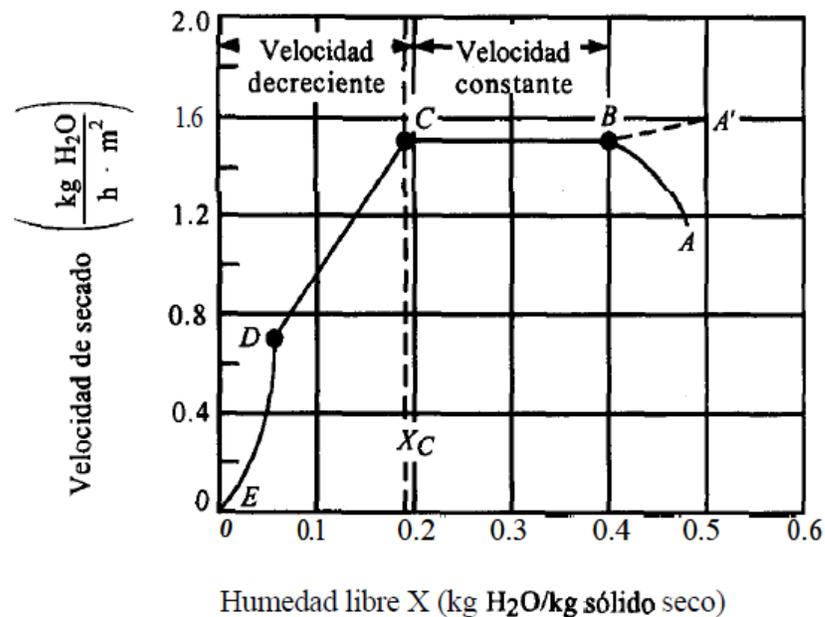
⁵ GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. p. 545.

2.5. Cinética de secado

La velocidad de secado de un sólido es la cantidad de masa de agua extraída en forma de vapor del sólido por unidad de tiempo por unidad de área.

Habitualmente el comportamiento del secado de un sólido se representa a través de curvas de velocidad de secado, las cuales son representaciones graficas del comportamiento de la velocidad del secado de un sólido característico. Por lo general las curvas de velocidad de secado se divide en dos zonas principales que son: periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente.

Figura 1. **Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre**



Fuente: GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. p 598.

2.5.1. Periodo de velocidad contante

Este periodo se presenta después del lavado del grano, donde el grano se encuentra cubierto por una película de agua continua. Esta capa de agua es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana.

2.5.2. Periodo de velocidad decreciente

El periodo de velocidad decreciente inicia en el punto crítico de humedad, momento donde termina el periodo de velocidad constante. Este punto marca el instante en que el agua líquida de la superficie es insuficiente para recubrir el área de secado del sólido.

En el periodo de velocidad decreciente, el grano se va secando de afuera hacia adentro, por lo que cada vez es más difícil y a la vez más lento, por lo que la velocidad de secado disminuye a medida que disminuye la humedad.

2.6. Desecación del grano de café

La operación del secado busca disminuir el agua del grano de café, previamente lavado y escurrido de una forma natural o mecánica. El café debe quedar en un punto comercialmente aceptado, que reúna las características para almacenarlo, venderlo o trillarlo posteriormente.

El mecanismo de secado de café es más complicado que el de cualquier otro grano pues este, después de lavado contiene alrededor de 55 % de humedad. Puede ocurrir volatilización de componentes aromáticos, si se emplean altas temperaturas y, al mismo tiempo, el efecto negativo que las condiciones de operación pueden ocasionar en el aspecto físico y particularmente en la bebida.

Con la evolución de la industria del café y la demanda de estándares internacionales, diversos organismos han establecido parámetros que permitan las condiciones óptimas del grano en el proceso. Debido a esto, la Organización Internacional del Café ha definido que el proceso de secado debe llevar el café a una humedad en el rango de 10 % -12 % en base húmeda.

2.6.1. Métodos para el secado de café

Generalmente el proceso de secado de café pergamino se realiza por cualquiera de los siguientes dos métodos: secado a patio y secado mecánico.

2.6.1.1. Secado en patio

Los patios son grandes losas de concreto con cierta inclinación para desagüe y expuestos a la intemperie en donde el sol irradia directamente el café extendido sobre el suelo, sin protección de factores externos y perjudiciales.

Es el método más antiguo del secado del café, que consiste en extender sobre el suelo camas delgadas de café, alrededor de 5 centímetros de espesor. Con el fin de mantener condiciones uniformes de humedad y temperatura en los

granos se necesita estar moviendo y esparciendo el café cada cierto tiempo, lo que provoca maltrato del grano.

Una de las mayores desventajas del método son las condiciones del clima, que pueden desfavorecer el proceso de secado e invertir el proceso.

Este método es utilizado por la Cooperativa en el inicio de la cosecha, que es una temporada de baja producción. En temporada de producción alta, los patios se suelen utilizar para un secado previo del grano antes de ingresar a las guardiolas, en este lapso lo que se busca es que el grano escurra la mayor cantidad posible del agua.

Figura 2. **Patio para secado de café pergamino**



Fuente: Cooperativa Acatenango R.L.

2.6.1.2. Secado mecánico

El secado mecánico de café se realiza utilizando cualquiera de dos tipos de elementos siguientes: guardiolas (secador rotatorio) y secadores de columna vertical. En ambos casos se hace pasar aire caliente a través de depósitos de café, con el fin de acelerar el tiempo de secado y aumentar la producción. La desventaja del uso de estos sistemas de secado radica en que tienden a afectar las características del café, ya que en muchas ocasiones se utiliza aire proveniente de chimeneas. De igual manera, el café se lastima por el roce con las paredes metálicas de los secadores.

2.7. Secado de café por lotes (secado discontinuo)

El secado de café por lotes es un sistema de secado que se opera de modo intermitente. El secador se carga con los granos de café, que permanecen en el equipo hasta que se logra la humedad deseada, entonces el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote.

2.8. Sistema de secado de la Cooperativa Acatenango

Los componentes principales del sistema de secado de la Cooperativa son: secadores rotatorios tipo guardiolas, ventiladores centrífugos, intercambiadores de calor y una caldera.

2.8.1. Secadores rotatorios tipo guardiolas

El secador tipo guardiola es llamado así en honor a su inventor español Josep Guardiola. Es un secador común en los beneficios por su amplia capacidad de carga, puede contener desde cien quintales de café húmedo

hasta 250 quintales de café húmedo, proporcionando un proceso a gran escala y con calidad en el secado del grano.

Los secadores empleados en este caso consisten en un cilindro hueco que gira sobre cojinetes apropiados. Cada uno de los cilindros tiene una longitud y diámetro de 5,35 m y 1,82 m respectivamente. La velocidad de rotación de los cilindros es de 3 revoluciones por minuto con capacidad de almacenamiento de 120 quintales de producto seco. Cada una de las guardiolas es impulsada por acción de un motor eléctrico que genera 1 740 revoluciones por minuto, con una potencia de 7,5 Hp o 5,5 kW.

Figura 3. **Secador rotatorio tipo guardiola**



Fuente: Cooperativa Acatenango R.L.

2.8.2. Ventiladores

Los ventiladores son dispositivos mecánicos para mover o desplazar aire a través de las guardiolas. El tipo de ventilador utilizado es uno centrífugo de alabes curvados hacia atrás, tienen un rodete con los alabes inclinados en sentido contrario al de la rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía del tipo "no sobrecargable".

Estos ventiladores tienen una capacidad de revolución de 1 800 revoluciones por minuto, una capacidad de 13 000 pies cúbicos de aire por hora y son por motores eléctricos trifásicos que tiene una potencia de 5,0 Hp o 3,7 kW.

Figura 4. **Ventilador centrífugo**



Fuente: Cooperativa Acatenango R.L.

2.8.3. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor utilizados son radiadores que permiten el intercambio de calor entre los fluidos agua y aire. La emisión de calor del radiador se genera por la diferencia de temperatura entre su superficie y el ambiente que le rodea y de la cantidad de superficie en contacto con el ambiente. En el interior del radiador circula vapor de agua a una temperatura de 70 grados.

Figura 5. **Intercambiador de calor**



Fuente: Cooperativa Acatenango R.L.

2.8.4. Caldera

Una caldera es una máquina térmica que está diseñada para generar vapor saturado. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en el cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. Las calderas son un caso particular de

intercambiadores de calor, en las cuales se produce un cambio de fase. Además, son recipientes a presión, por lo cual son construidas en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. Existen básicamente dos tipos de calderas.

La caldera utilizada es de tipo pirotubular, en la cual el agua en estado líquido se encuentra en un recipiente y es atravesado por tubos, en los cuales circula fuego y gases producto de un proceso de combustión; tiene una capacidad de 1 200 kg/h y una presión de trabajo de 6,0 kgf/cm².

La función de la caldera es proporcionar vapor de agua para el calentamiento del aire, la temperatura y presión de la producción de vapor son de 70 grados centígrados y 40 psi.

Figura 6. **Caldera Engeman**



Fuente: Cooperativa Acatenango R.L.

2.8.5. Equipo de transporte

El equipo de transporte sirve de complemento al sistema de secado, este está conformado por: dos elevadores, tres bandas transportadoras aéreas, una banda transportadora subterránea. El funcionamiento de estos equipos es el siguiente: los trabajadores encargados del proceso de secado recogerán el café de los patios y lo transportarán hacia la fosa de entrada, ubicada a nivel del suelo. Una vez se encuentre llena la fosa de entrada, el elevador de carga elevará el café hacia una banda transportadora de carga y luego a una de distribución, la cual depositará el café en la tolva de la secadora que previamente se ha planificado para el secamiento de la respectiva partida.

Cuando el café esté completamente seco, se descargará la guardiola, el café caerá por gravedad a la tolva de descarga, la cual actúa como embudo y envía el café a la banda transportadora subterránea de descarga. La banda de descarga entrega el café al elevador de descarga del silo, que eleva el café para ser descargado en una banda transportadora aérea que lo envía al silo de almacenamiento de café seco en la bodega.

2.9. Fuente de energía

La caldera utilizada es alimentada por combustible sólido, leña de gravillea robusta. Por lo habitual, el contenido de humedad de la leña recién cortada es del 40 % y 50 %; la leña que se utiliza como combustible en la caldera es secada al sol, e ingresa a esta con una humedad máxima del 25 %.

El contenido de ceniza de la corteza de la leña es mayor que en el interior del tronco y se sitúa alrededor del 3 %. La temperatura de fusión de las cenizas es relativamente alta, es decir de 1 300 a 1 500 °C, y normalmente no

constituye un factor limitante en el proceso de combustión, en vista de que las temperaturas necesarias son más bajas. La composición química porcentual de la leña aparece en la tabla I.

Tabla I. **Composición química de la leña en base húmeda**

Compuesto químico	Contenido de humedad (% b.h.)		
	0	20	40
Carbono	50,30	40,24	40,18
Hidrogeno	6,20	4,96	3,72
Oxigeno	43,08	34,46	25,85
Nitrógeno	0,04	0,03	0,02
Azufre	0,00	0,00	0,00
Cenizas	0,37	0,31	0,23
Total	10,00	10,00	100,00

Fuente: Docrep. *Composición química*. <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>.

Consulta: 14 de septiembre de 2018.

Como se observa, el porcentaje de azufre es insignificante, lo que garantiza que el uso de este combustible disminuye el riesgo de contaminación, así como la alteración de las propiedades organolépticas del grano.

La leña utilizada como combustible en la caldera es leña de *gravillea* robusta, la cual presenta las siguientes características:

Tabla II. **Datos tecnológicos de la gravilea robusta**

Densidad de la madera (g/cc)	0,515
Densidad de la cascara (g/cc)	0,493
Poder calorífico (cal/g)	4 528
Carbono fijo (%)	81,1
Materiales volátiles (%)	16,6
Cenizas (%)	2,3

Fuente: FERREIRA, Carlos, GONZALES Emerson. *El potencial de la gravilea (Gravillea robusta A. Cunn) para la reforestación*. p. 175.

El elevado contenido de materiales volátiles de la leña de la gravilea influye en la temperatura mínima exigida para su combustión completa.

La leña se consigue en las diferentes fincas de la región. Popularmente se maneja una medida llamada “tarea de leña”, la cual consta de una vara de alto por cuatro varas de largo. Cuando se hace la tarea, cada leño es cortado aproximadamente de 50 cm de largo. Se podría decir que una tarea de leña equivale a 1,40 metros cúbicos de leña.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Son consideradas como variables aquellos entes que están sujetos a algún tipo de variación en el proceso de la experimentación. En el presente estudio trataremos con dos tipos de variables; variables dependientes y variables independientes.

- Variables dependientes, son aquellas que dependen del valor que tomen otros fenómenos o variables.
- Variables independientes, son variables que no dependen otras variables, si no por el contrario, estas influyen en los valores de otras variables.

Tabla III. **Clasificación de variables que influyen en la determinación de las curvas de secado**

Variable	Independiente	Dependiente	Constante
Tiempo	X		
Humedad de grano		X	
Masa de grano seco	X		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Registro de variables para conocer la eficiencia térmica del sistema de secado**

Recurso	Variable	Independiente	Dependiente
Leña	Gasto		X
	Humedad	X	
Aire	Temperatura	X	
	Humedad		X
Grano de café	Temperatura		X
	Humedad		X

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Registro de las variables que definen el consumo energético**

Recurso	Variable	Tipo de variable		
		Dependiente	Independiente	Constante
Leña	Gasto	X		
Motores eléctricos	Potencia		X	X
	Eficiencia		X	X
	Consumo	X		
Tiempo	Tiempo		X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El desarrollo de la investigación acerca del proceso de secado mecánico del grano de café se limita específicamente para el lugar y el sistema que se cita a continuación:

- Ubicación: Acatenango, Chimaltenango.
- Instalaciones físicas: Cooperativa Acatenango R.L.
- Equipo: sistema de secado mecánico.
- Unidad de análisis: proceso de secado mecánico del grano de café en pergamino.
- Conocimientos utilizados: transferencia de calor y transferencia de masa.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Enmer Arnulfo Marroquín Juárez
- Asesor: Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello
- Técnicos de la Cooperativa
- Supervisor encargado del proceso de secado del café
- Otros: operadores y cargadores

3.4. Recursos materiales disponibles

En esta sección se citan todos los materiales utilizados para el desarrollo de la fase experimental, los cuales son todos aquellos elementos requeridos para medición de variables, registro de las mediciones, equipos del sistema de secado, materia prima y materiales que intervienen en el funcionamiento de las partes del sistema.

3.4.1. Materia prima

La materia prima utilizada para el desarrollo del estudio fueron granos de café en pergamino.

3.4.2. Equipo de protección personal

El equipo de protección personal utilizado cuando se efectuó el proceso de secado fue el siguiente: botas industriales, casco, protectores auditivos, lentes de seguridad y guantes térmicos.

3.4.3. Herramientas de medición

Los instrumentos de medición utilizados para efecto de la investigación fueron: balanza electrónica, cinta métrica, cronometro digital, termómetro de mercurio, termohigrómetro y medido de humedad de granos de café.

3.4.4. Elementos del sistema de secado

Los componentes del sistema de secado que hacen posible que se desarrolle el proceso de secado son los siguientes: 6 guardiolas marca pinhalense, 1 caldera tipo pirotubular vertical marca Engeman, 6 ventiladores centrífugos marca pinhalense, 6 intercambiadores de calor y motores eléctricos.

3.4.5. Equipo de escritorio

El equipo y material de escritorio utilizado para el registro y tabulación de los datos fue el siguiente: computador, impresora, hojas de papel, instrumentos de escritura, calculadora científica.

3.4.6. Otros materiales

Otros de los materiales indispensables que intervienen en el proceso del secado del grano de café son leña y agua. La leña se utiliza como combustible en la caldera donde se calienta agua la cual circula por un circuito con la finalidad de calentar el aire que se utiliza para secar el grano de café dentro de las recamaras de las guardiolas.

3.5. Técnica cuantitativa

El estudio realizado es estrictamente cuantitativo dado que los parámetros demandan ser evaluados y los resultados expresados de esta forma. La técnica cuantitativa se pone de manifiesto en todo momento de la investigación; en la recolección de la información, tabulación de datos y presentación de resultados.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La información requerida para realizar la evaluación de la operación del sistema de secado fue obtenida de diferentes fuentes y medios tal como se resume a continuación:

Tabla VI. **Recolección y ordenamiento de la información**

Fuente	Información obtenida
Página de Insivumeh	Altitud sobre el nivel del mar y presión atmosférica del municipio de Acatenango, Chimaltenango.

Continuación de la tabla VI.

Fuente	Información obtenida
Software: CTYSoft Psychometric Chart 2.2 Demo.	Carta psicrométrica del aire del municipio de Acatenango Chimaltenango.
Motores eléctricos de equipos del sistema de secado.	Características de motores: eficiencia y potencia.
Guardiola.	Dimensiones: longitud y diámetro. Capacidad de contención.
Caldera.	Consumo de leña.
Empresa eléctrica.	Tarifa de electricidad.
Fase experimental en el sistema de secado.	Condiciones de temperatura y humedad del grano de café pergamino y del aire en el ambiente, en la entrada y en la salida de las guardiolas.
Personal de la Cooperativa.	Especificaciones del grano de café.

Fuente: elaboración propia.

En el transcurso del proceso la información recopilada se ordenó principalmente en tablas, facilitando así la manipulación de los datos.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En la siguiente tabla se ofrece una clasificación de la forma en que la información obtenida fue tabulada en la documentación correspondiente.

Tabla VII. **Tabulación de la información**

Etapas de la investigación	Variable	Fuente o medios de obtención de datos	Documentación
Preliminares	Tipo de combustible	Investigación	Marco teórico
	Humedad del grano requerida	Cooperativa	Marco teórico
Caracterización del aire del lugar	Presión, condiciones de aire.	Investigación	Tabla XVI
		Software	Carta psicrométrica
Características de motores	Potencia de motores	Observación	Tabla XVIII
	Eficiencia de motores		
Fase experimental	Humedad del aire	Termohigrómetro	Tabla XV
	Temperatura del aire		
	Humedad del grano	Medidor de humedad	
	Temperatura del grano	Termómetro	

Continuación tabla VII.

Etapas de la investigación	Variable	Fuente o medios de obtención de datos	Documentación
Fase experimental	Tiempo del proceso	Cronómetro digital	
	Gasto de leña	Observación	Tabla XXIII
Procesamiento de la información y resultados	Contenido de humedad del grano fase seca.	Gasto de leña y consumo energético del grano.	Tabla XXII, Resultados
	Velocidad de secado		
	Consumo energético	Leña y motores eléctricos	Tabla XXI, Tabla XXII
	Costo del secado		
	Eficiencia térmica	Gasto de leña y consumo energético del grano.	Tabla XXII, Resultados
	Calidad del producto	Muestras de producto final	Tabla XXIV, Tabla XXV.

Fuente: elaboración propia.

El procesamiento de la información se realizará mediante la aplicación de definiciones matemáticas correspondientes a las variables que se desean

calcular, utilizando software para la agilización de los cálculos y caracterización grafica del comportamiento de variables.

Los datos intermediarios obtenidos de manipulaciones matemáticas sobre datos experimentales, que son de importancia, serán ordenados en tablas para su presentación.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizará sobre las dos hipótesis nulas establecidas previamente en la sección de hipótesis.

- Hipótesis nula 1: la humedad del grano de café pergamino, como producto final del proceso de secado mecánico, no varía significativamente entre guardiolas.

Para confrontar esta hipótesis se realizará un análisis de varianzas de un solo factor, ANOVA, de los datos de la tabla IX, utilizando un nivel de confianza del 95 %.

- Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$
- H1: No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia α : como el nivel de confianza es del 95% (0,95), el nivel de significancia es del 5 % (0,05).
- Estadístico de prueba F: se obtiene del análisis de varianza (ANOVA), contemplado en la presente tabla.

Tabla VIII. **Análisis de varianza (ANOVA)**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Tratamientos	k-1	SCTR	CMTR	CMTR/CME
Error	n-k	SCE	CME	
Total	n-1	SCT	CMT	

Fuente: elaboración propia.

Donde:

k = número de tratamientos (número de secadores)

n = número total de observaciones

SCTR = suma de cuadrados de los tratamientos

SCE = suma de cuadrados del error

CCT = suma de cuadrados totales

CMTR = cuadrado medio del tratamiento

CME = cuadrado medio del error

CMT = cuadrado medio del total

- Suma de cuadrados de los tratamientos

$$CSTR = \sum n_i (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

Donde:

CSTR = suma de cuadrados de tratamientos

n_i = número de observaciones del tratamiento i

\bar{X}_j = media aritmética del tratamiento ubicado en la columna j

$\bar{\bar{X}}$ = gran media

La gran media se define como:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum X_{ij}}{n} \quad (2)$$

Donde:

n = total de observaciones

X_{ij} = observación ubicada en la fila i y columna j

La media del tratamiento se calcula mediante la ecuación:

$$\bar{X}_j = \frac{\sum x_i}{n_i} \quad (3)$$

Donde:

x_i = observación de un tratamiento

- Suma de cuadrados del error

$$SCE = \sum \sum (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (4)$$

Donde:

SCE = suma de cuadrados del error

i = número de la fila (observación por tratamiento)

j = número de la columna (tratamiento)

X_{ij} = observación ubicada en la fila i y columna j

- Suma de cuadrados totales

$$SCT = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (X_{ij} - \bar{X})^2 \quad (5)$$

Donde:

SCT = suma de cuadrados totales

- cuadrado medio del tratamiento

$$CMTR = \frac{SCTR}{k - 1} \quad (6)$$

Donde:

k = número de tratamientos

- cuadrado medio del error

$$CME = \frac{SCE}{n - k} \quad (7)$$

Donde:

n = número total de observaciones

- cálculo de F de Fisher

$$F = \frac{CMTR}{CME} \quad (8)$$

Donde:

F = estadístico F de Fisher

- Parámetro de comparación (F crítica): este parámetro se encuentra tabulado en la tabla de los anexos. Se ubica el valor de la F crítica de la forma:

$$F_C = F_{(\alpha, k-1, n-k)}$$

Donde:

n, k = número de observaciones y tratamientos respectivamente

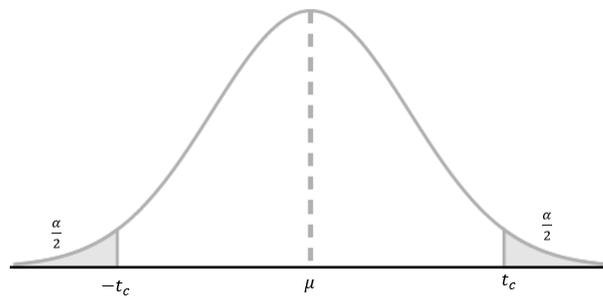
α = nivel de significancia

- Conclusión
 - Si $F < F_C$, se aceptará la hipótesis nula
 - Si $F > F_C$, se rechazara la hipótesis nula
- Hipótesis nula 2: la humedad del grano de café en pergamino, obtenido como producto al final del proceso de secado, es igual a 12 %.

Para la confrontación de esta hipótesis se hará uso del estadístico T-Student con un nivel de confianza del 95 %.

- Ho: $\mu = 12 \%$
- H1: $\mu \neq 12 \%$
- μ = humedad promedio poblacional del grano de café.
- Nivel de significancia, $\alpha = 5 \%$

Figura 7. **Distribución normal de probabilidad**



Fuente: elaboración propia.

- Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (9)$$

Donde:

\bar{X} = media aritmética de las observaciones

S = desviación estándar de las observaciones

n = número de observaciones

- Media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (10)$$

- Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

- Parámetro de comparación (t crítica)

Este parámetro se encuentra tabulado en la tabla XXVI.

$$t_c = \pm t\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right)$$

- Conclusión

- Si $-t_c \leq t \leq t_c$, se acepta la hipótesis nula
- Si $t < -t_c$ o si $t > t_c$, se rechaza la hipótesis nula

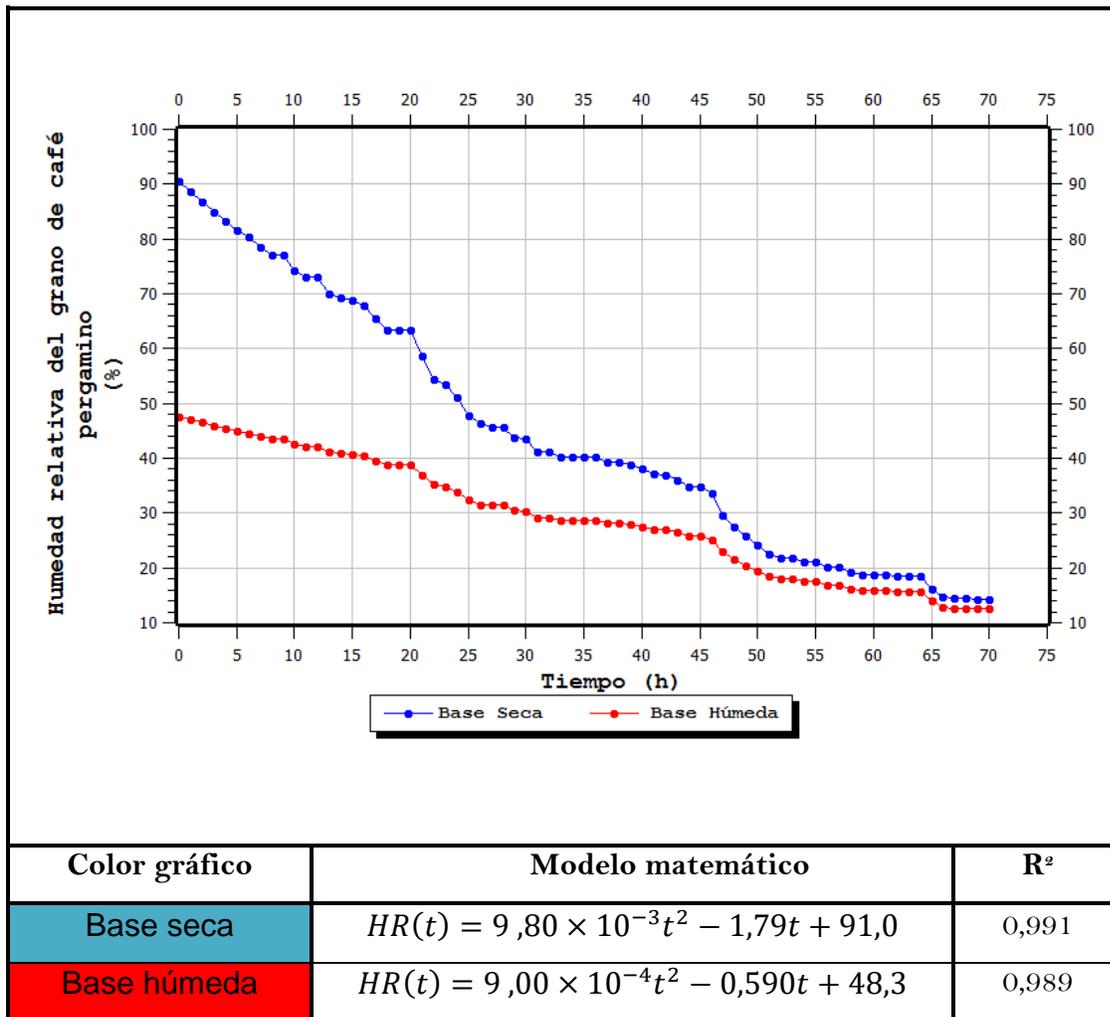
4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del curso de secado

El curso de secado del grano de café se describe mediante la construcción de las curvas de secado. La caracterización del curso de secado se describe mediante los perfiles presentados por el comportamiento de la humedad relativa del grano de café en pergamino en función del tiempo, comportamiento del contenido de humedad del grano de café en pergamino en función del tiempo, comportamiento de la velocidad de secado en función del tiempo y el comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad.

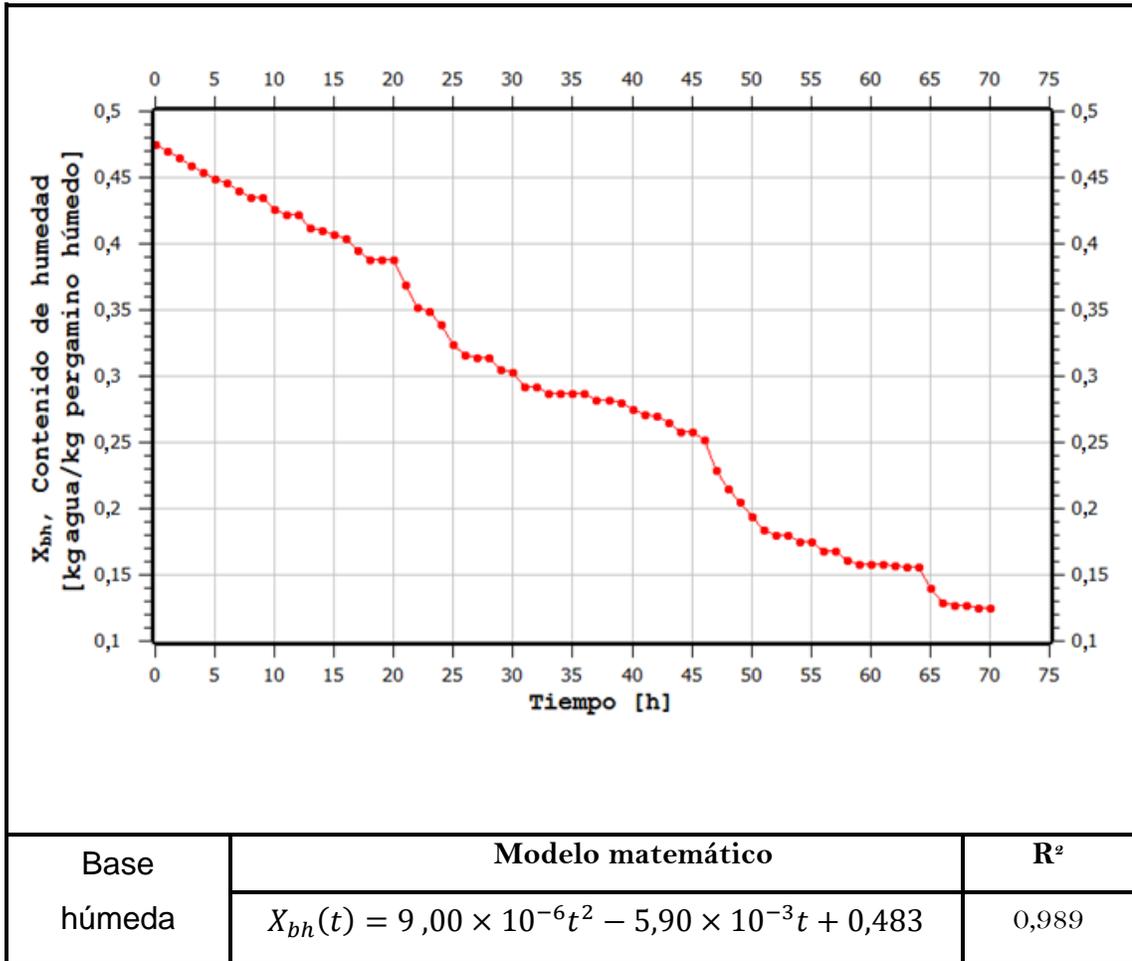
A continuación, se presentan las curvas de secado del grano de café en pergamino, de la región de Acatenango; en las figuras 8, 9, 10, 11, 12.

Figura 8. Comportamiento de la humedad relativa del grano de café en pergamino en función del tiempo



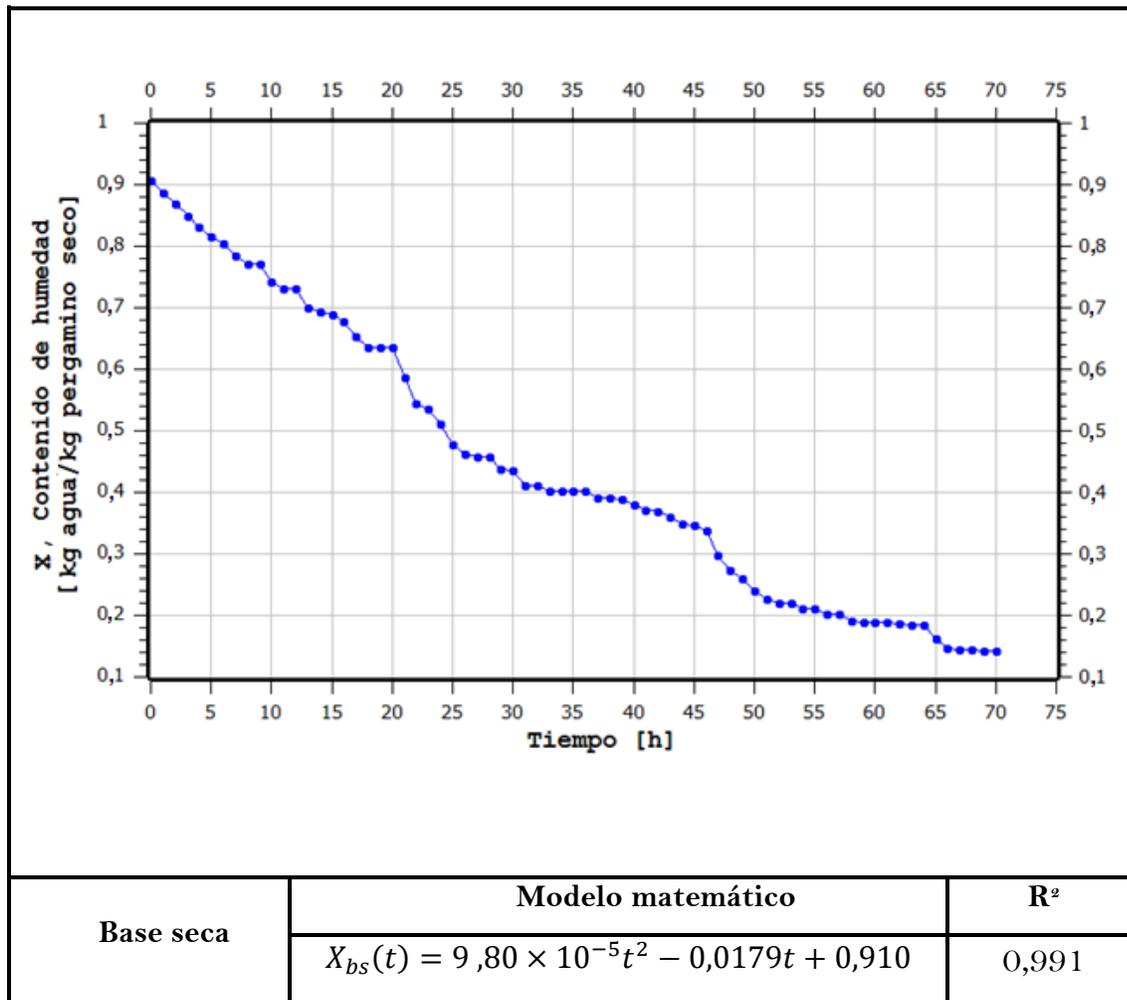
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Figura 9. Comportamiento del contenido de humedad del grano de café en pergamino, en base húmeda, en función del tiempo



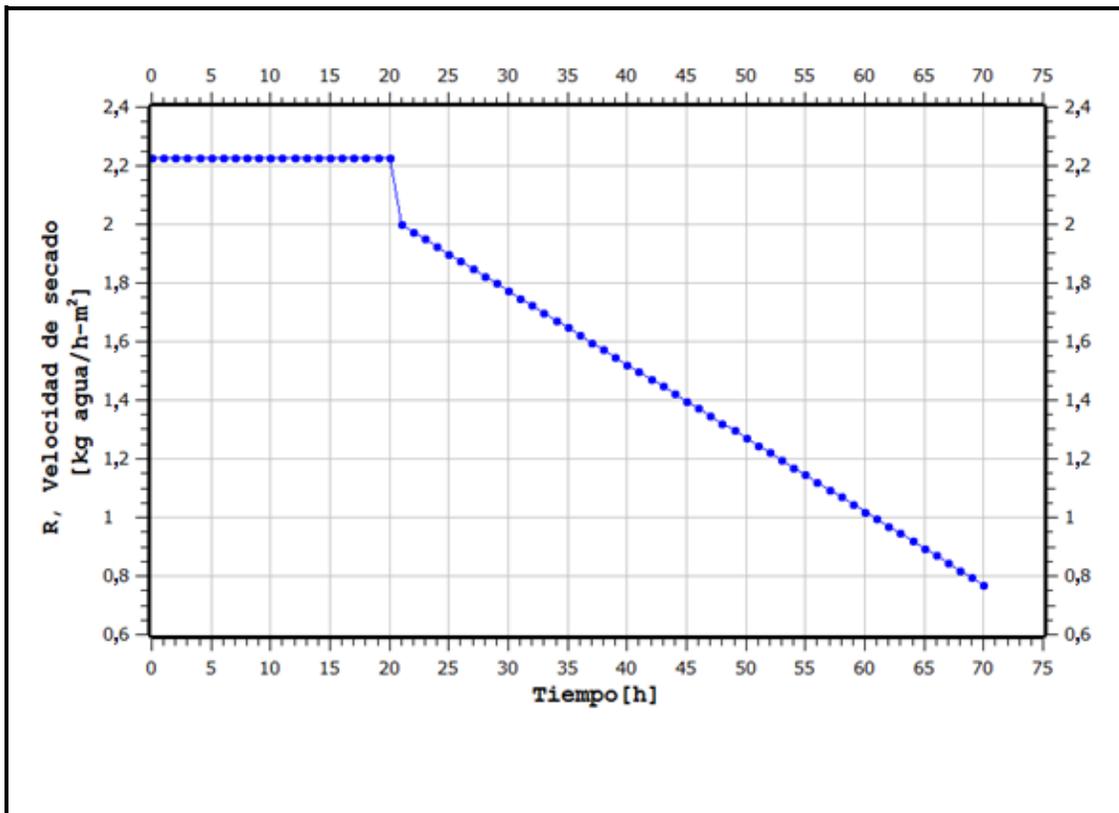
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Figura 10. Comportamiento del contenido de humedad del grano de café en pergamino, en base seca, en función del tiempo



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

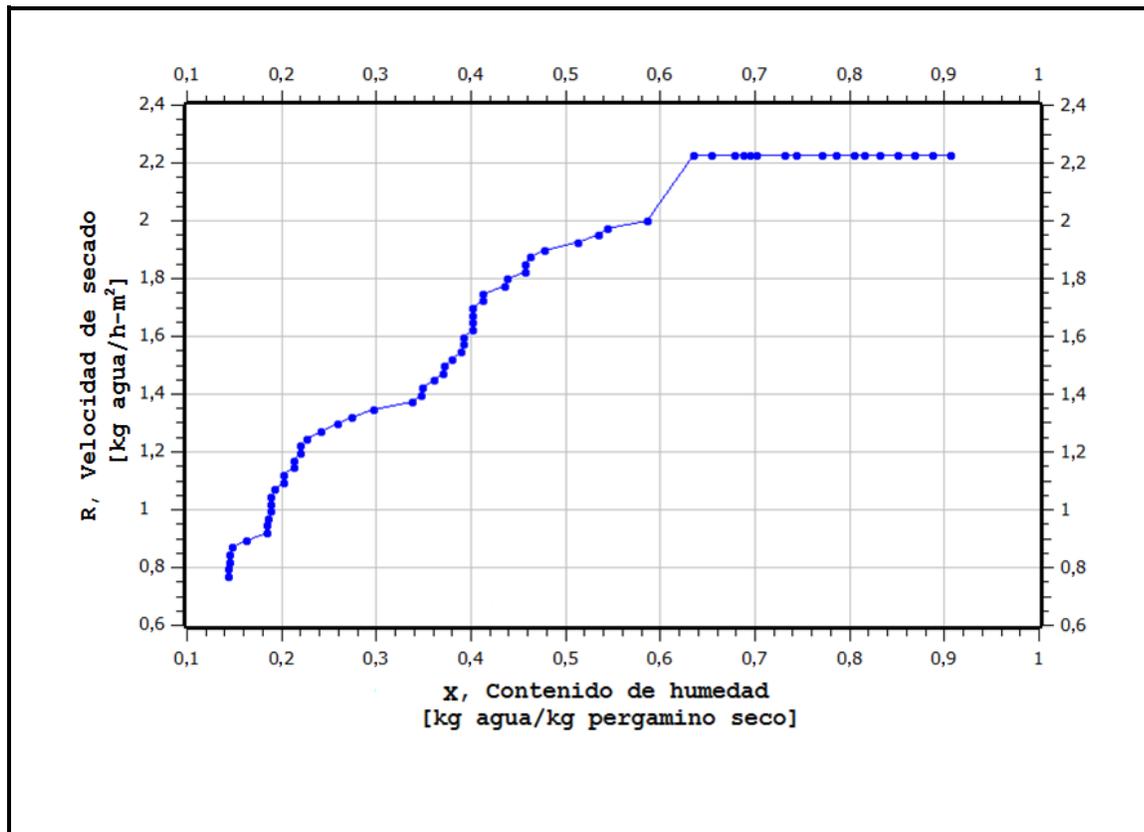
Figura 11. Comportamiento de la velocidad de secado del grano de café en pergamino en función del tiempo



Período de velocidad	Modelo matemático	Rango de validez	R ²
Constante	$R(t) = 2,23$	$0 \leq t \leq 20$	1,00
Decreciente	$R(t) = -0,0251t + 2,02$	$20 < t < 70$	1,00

Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Figura 12. Comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad



Periodo de velocidad	Modelo matemático	R ²
Constante	$R(X) = 2,23$	1,00
Decreciente	$R(X) = -1,62X^2 + 3,94X + 0,323$	0,974

Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

4.2. Consumo energético

Es la cantidad de energía que demanda el sistema de secado para llevar a cabo la operación de secado de un lote de café pergamino. Este consumo se

debe principalmente a la energía eléctrica que demandan los motores eléctricos que intervienen en la operación y a la energía que suministra la leña consumida durante el proceso.

Tabla IX. **Consumo energético demandado en el secado de un lote de café en pergamino**

Fuente de energía	Cantidad de energía (kJ)
Leña	487 275 978,13
Electricidad	16 667 642,47
Demanda total de energía	503 943 620,60

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

4.3. Eficiencia térmica

Representa la relación entre la energía utilizada para el secado del grano de café y la energía suministrada por la cantidad de combustible (leña) gastada durante el proceso de secado de un lote de café pergamino.

Tabla X. **Eficiencia térmica del sistema de secado**

Eficiencia térmica (%)
11,2

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

4.4. Costo energético

Es el costo, en quetzales, que implica el consumo energético demandado por el proceso de secado de un lote de café pergamino en la cooperativa Acatenango. Este costo es debido principalmente al consumo eléctrico de los motores del sistema y el costo de la compra de la cantidad de leña utilizada.

Tabla XI. **Costo energético de la operación del sistema de secado en el secado de un lote de café en pergamino**

Descripción	Costo (Q.)
Costo de energía eléctrica	9 661,94
Costo de leña consumida	3 184,00
Total	12 845,94

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

4.5. Tiempo óptimo de secado

Es el tiempo ideal que debe durar el proceso de secado para lograr la condición del 12 % de humedad, en base húmeda, en el grano de café pergamino.

Tabla XII. **Tiempo óptimo de secado**

Período de velocidad	Tiempo (h)
Constante	19,08
Creciente	52,12
Total	71,20

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

4.6. Análisis estadístico

Es la verificación, con base a los resultados obtenidos, de las hipótesis planteadas, sobre las condiciones de calidad, con que se obtiene el grano de café en pergamino después que ha sido sometido al proceso de secado en el sistema utilizado para este proceso por la Cooperativa Acatenango R.L.

4.6.1. Análisis de varianza

Análisis estadístico utilizado para determinar si existe diferencia significativa o no entre la humedad del grano de café en pergamino entre las diferentes guardiolas.

Tabla XIII. **Resultados del análisis de varianza**

F calculada	F crítica	Conclusión
0,211	2,394	Se acepta Ho

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

4.6.2. Prueba T-Student

Este análisis estadístico se realizó para caracterizar las condiciones del grano de café pergamino, es decir, para verificar si efectivamente la humedad del grano de café pergamino en las diferentes guardiolas es del 12 % finalizado el proceso de secado.

Tabla XIV. Resultados de la prueba de T-Student

Guardiola	T-Student Calculada	T-Student Crítica	Conclusión
1	1,52	2,262	Se acepta Ho
2	1,042	2,262	Se acepta Ho
3	1,784	2,262	Se acepta Ho
4	0,293	2,262	Se acepta Ho
5	1,09	2,262	Se acepta Ho
6	1,206	2,262	Se acepta Ho

Fuente: elaboración propia, datos calculados.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El sistema de secado mecánico utilizado por la Cooperativa Acatenango en el proceso de secado del grano de café pergamino, es un sistema que consta de una serie de equipos que operan de modo simultaneo para lograr las condiciones deseadas de humedad en el grano de café. La parte fundamental de la presente investigación es la de conocer las características y particularidades del sistema y de su operación, para lo cual se presenta a continuación una breve descripción del comportamiento de los resultados obtenidos como parte de un proceso experimental donde se pretende evaluar la operación de este sistema.

En la sección de resultados, sección 3, se pueden observar los diferentes resultados obtenidos como parte de la evaluación del sistema de secado. En primera instancia se presenta el comportamiento del curso de secamiento del grano de café a través de las curvas de secado. En las figuras 8, 9 y 10 se muestra el comportamiento del contenido de humedad del grano en función del tiempo, la tendencia de las gráficas indica un decremento de la cantidad de agua en el grano de café a medida que transcurre el tiempo de secado, esta pérdida se debe principalmente a los fenómenos de transferencia de calor y transferencia de masa entre el grano de café y el aire utilizado en el proceso de desecación.

Por el comportamiento de la pendiente en cada punto de las diferentes curvas se puede concluir que a medida que transcurre el tiempo la cantidad de agua que se extrae es menor, observándose que cada vez la pendiente de la curva se aproxima a cero indicando de esta forma que el cambio en el

contenido de humedad en el grano es menor con el tiempo, este fenómeno se debe a que inicialmente la cantidad de agua que se retira del grano de café es agua no ligada, es decir, agua que se encuentra en la superficie del grano de café y por tanto la energía necesaria para evaporar o transferir el agua desde la superficie del grano es menor que la energía necesaria para evaporar o transportar el agua que se encuentra en los intersticios del grano que es el agua que se extrae después de retirada a su totalidad el agua de la superficie.

En la figura 11 se presenta el comportamiento de la velocidad de secado en función del tiempo, se observa que la tendencia de esta curva se desarrolla en dos formas diferentes, presentando un comportamiento constante durante las primeras 20 horas del proceso y transcurrido este tiempo el comportamiento de la velocidad es de forma decreciente.

La tendencia de la velocidad de secado es constante debido a que en este periodo únicamente se está extrayendo agua no ligada al grano de café, como se mencionó anteriormente el agua que es extrae en este periodo es agua que cubre toda la superficie del grano.

Por otro lado, la velocidad de secado sigue una tendencia decreciente cuando se está retirando agua ligada al grano de café, la velocidad en este caso está disminuyendo ya que a medida que se avanza en el retiro del agua ligada es necesario agregar más energía para extraer agua que se encuentra más profunda en los intersticios del grano y como la transferencia de energía se desarrolla de forma constante la cantidad de agua retirada disminuye gradualmente.

En la figura 12 se ilustra el comportamiento de la velocidad de secado en función del contenido de humedad, la interpretación de esta gráfica se debe

realizar de derecha a izquierda. El comportamiento de la gráfica fortalece lo expuesto previamente; primero establece que la velocidad de secado se desarrolla de forma constante y de forma decreciente en diferentes intervalos de tiempo, segundo, se evidencia los dos periodos de velocidad, constante y decreciente. En el periodo de velocidad decreciente se afirma lo expuesto en la teoría, lo cual indica que la velocidad de secado disminuye a medida que disminuye el contenido de humedad del grano, la razón de este comportamiento se debe al aumento de energía que se necesita a medida que se va extrayendo agua del interior del grano.

Como parte de la evaluación del sistema donde se desarrolla el proceso de secado, se cuantificó el consumo energético demandando en el secado de un lote de café pergamino, esta cuantificación se presenta en la tabla IX donde se observa que el mayor porcentaje de energía proviene de la leña utilizada como combustible para efectuar el calentamiento del aire utilizado para el secado del grano en el proceso; esto es debido a variedad de factores que se exponen más adelante cuando se analice la eficiencia térmica del sistema.

El consumo eléctrico reportado es energía eléctrica consumida por motores eléctricos en su totalidad, el alto consumo de energía se debe al tiempo prolongado que dura el proceso de secado, considerando que el consumo energético por un lote es proporcional al tiempo empleado para el secado de un lote de café.

En la tabla X se pone de manifiesto la eficiencia térmica del sistema de secado en cuestión, esta eficiencia es la confrontación de la energía útil en el proceso de secado, es decir, la energía utilizada para el secado del grano de café y la energía suministrada al sistema por parte de la leña. Se logra apreciar que la eficiencia térmica del sistema de secado es relativamente baja, con un

11,2 %, esto es debido a varias razones, la determinación de cada una de las partes, energía útil y energía suministrada, se determinaron a partir de datos experimentales junto con datos teóricos lo cual implica una variación en los resultados. Otro de los factores influyente en este resultado es el de las condiciones ambientales, como se pudo apreciar la humedad de la región es demasiado alta y considerando que la superficie de la guardiola es de aspecto perforado el aire caliente que proviene del sistema se ve afectado por el aire circundante del ambiente.

También se debe tomar en cuenta que, para el cálculo de la eficiencia térmica, la humedad de la leña se considera constante en cada una de las cargas, pero es evidente que esto es falso, dado que, el calor obtenido de la leña es una función de la humedad contenida se puede obtener alteraciones en los resultados y de igual manera existen cantidad de variantes que pueden implicar una pérdida de calor o causar alteraciones en los cálculos de los resultados.

En la tabla XI se presenta el costo que implica el secado de un lote de café de 28 800 kg de pergamino totalmente seco, se verifica en la tabla que implica más gasto el consumo eléctrico de los motores que la adquisición de la leña consumida en el proceso.

En la tabla XII se muestra el tiempo de secado óptimo para llevar la humedad del grano a la humedad deseada del 12 % en base humedad bajo las condiciones de experimentación. Este tiempo es 1,20 horas mayor que el tiempo empleado por la entidad, la variación en el resultado es debido a que en la experimentación la humedad final del grano fue del 12,5 % mientras que los cálculos del tiempo óptimo se realizaron para obtener una humedad final en el grano de exactamente 12 %.

Como respuesta a la hipótesis 1 planteada se presenta la tabla resumen del análisis de varianza en la tabla XIII, comparando los estadísticos de Fisher se observa que la F calculada es menor que la F crítica, por lo tanto, se aceptó la hipótesis nula establecida; confirmado de esta forma que la humedad del grano de café pergamino en el producto final no varía significativamente entre guardiolas.

En la tabla XIV se muestra los resultados de la aplicación del estadístico T-Student para determinar si la humedad del grano al final del proceso de secado es del 12 % en base húmeda en cada una de las guardiolas, este resultado confronta la hipótesis 2. Se observa que la conclusión en el análisis de cada una de las guardiolas es la aceptación de la hipótesis nula establecida, de esta forma se confirma, estadísticamente, que la humedad del grano de café pergamino obtenida al final del proceso es del 12 %.

CONCLUSIONES

1. El secado del grano de café pergamino se desarrolla con velocidad constante durante las primeras 20 horas del curso de secamiento y con velocidad decreciente durante las 50 horas posteriores. El tiempo de retención del grano de café pergamino durante el proceso experimental fue de 70 horas.
2. El contenido de humedad crítica del grano de café pergamino fue de 0,635 kg agua/kg pergamino seco.
3. El consumo energético demandado por el sistema de secado mecánico de la Cooperativa Acatenango en el secado de un lote de 28 800 kg de pergamino completamente seco es de 503 493 620, 60 kJ desde una humedad de ingreso de 47,5 % y 12,5 % de salida, en base húmeda.
4. La eficiencia térmica del sistema de secado mecánico del grano de café pergamino utilizado por la Cooperativa Acatenango R.L. es de 11,2 %.
5. El costo energético implicado en el secado de un lote de 28 800 kg de pergamino seco por el sistema de secado mecánico de la Cooperativa Acatenango es de Q. 12 845,94.
6. El tiempo óptimo que debe durar el proceso de secamiento del grano de café pergamino, para disminuir la humedad del grano desde una humedad de ingreso de 47,5 % a una humedad final del 12 % en base humedad, es de 71,20 horas en las condiciones experimentales.

7. No existe diferencia significativa en la humedad del grano de café pergamino, en cada una de las guardiolas, finalizado el proceso de secamiento.

8. La humedad final del grano de café pergamino en las 6 guardiolas es del 12 % en base húmeda.

RECOMENDACIONES

1. Prolongar el tiempo de secado natural del grano de café pergamino previo a su ingreso a las guardiolas para reducir tiempos de secado y, por ende, reducción del costo de la operación.
2. Utilizar un combustible que proporcione un mayor poder calorífico.
3. Proporcionar mantenimiento constante a la caldera y tubería transportadora de agua para eliminar impureza que afecten la transferencia de calor hacia el agua y el flujo de esta en su recorrido.
4. Utilizar un medidor de humedad de granos de café para monitorear el comportamiento de la humedad del grano en el proceso de secado.
5. Realizar un estudio que permita evaluar hasta qué grado es posible elevar la temperatura del aire de secamiento sin afectar la calidad del producto final.
6. Evaluar la posibilidad de instalar paneles fotovoltaicos que proporcionen la corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento correcto de los motores eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

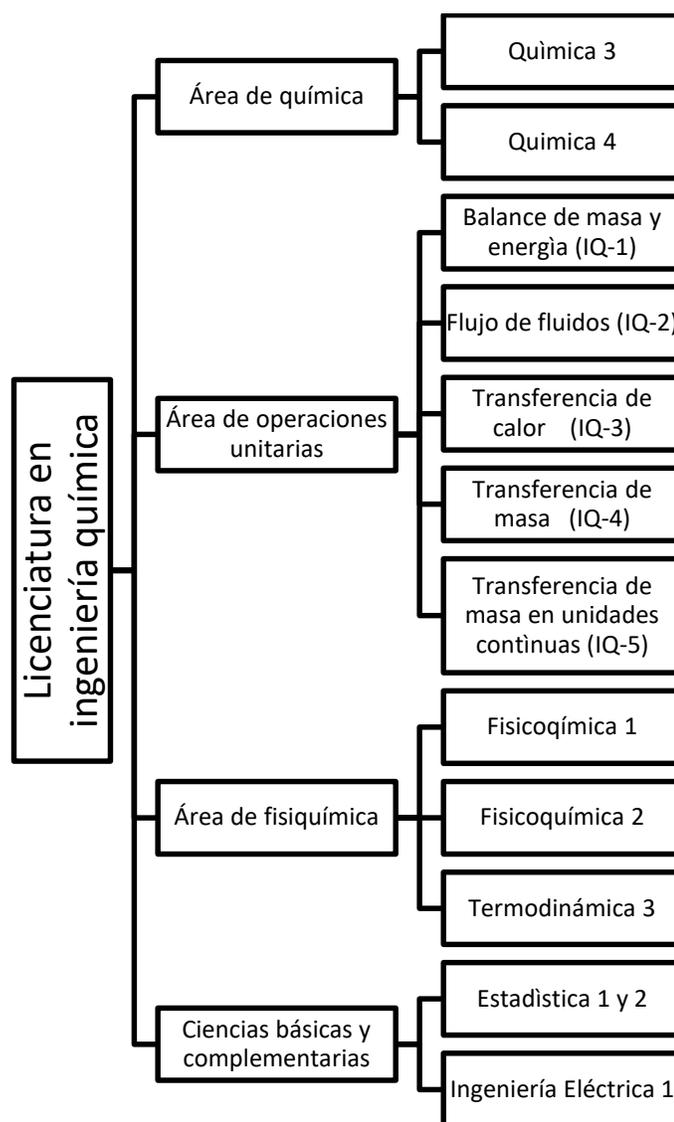
1. ALARCÓN MELÉNDEZ, Mario Ricardo. *Propuesta de un sistema de secado semiautomatizado de café, para generar un proceso productivo y eficiente, en la Cooperativa Acatenango, Acatenango, Chimaltenango*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 185 p.
2. *Anacafé. Especies y variedades del cafeto* [en línea] https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_VariedadesCafeto>. [Consulta: 14 de septiembre de 2018].
3. _____. *Historia del café en Guatemala* [en línea] www.anacafe.org/glifos/index.php?title=Historia_del_cafe_Guatemala>. [Consulta: 14 de septiembre de 2018].
4. _____. *Variedades de café en Guatemala* [en línea] https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Variedades_de_cafe>. [Consulta: 14 de septiembre de 2018].
5. BOYLESTAD, Robert L. *Introducción al análisis de circuitos*. 10a. ed. México: Pearson Prentice Hall, 2004. 1 248 p.
6. Docrep. *Fuentes de energía, combustibles* [en línea] <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>>. [Consulta: 14 de septiembre de 2018].

7. FERREIRA, Carlos, GONZÁLES, Emerson. *El potencial de la gravilea (Gravillea robusta A. Cunn) para la reforestación*. Boletín de pesquisa florestal. Brasil. 1998. 246 p.
8. GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. 4a ed. México: CECOSA, 2006. 1 034 p.
9. MONTOYA, Esther Cecilia, OLIVEROS, Carlos Eugenio, ROA, Gonzalo. *Optimización operacional del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes para Café Pergamino*. Trabajo de graduación de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia, 1989. 114p.
10. MORA CARANQUI, Alex John. *Diseño de un secador rotatorio para granos de cacao con capacidad de 3 toneladas diarias para la producción nacional*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador, 2015. 114p.
11. PÉREZ ZAMORA, Yonatan David. *Determinación experimental de la eficiencia de un secador de túnel rotatorio en proceso discontinuo utilizando grano de café tipo arábigo en pergamino*. Trabajo de gradación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2013. 105 p.
12. ROBERT H., Perry. *Manual del ingeniero químico*. 7a ed. España: McGraw-Hill, 2001. 859 p. Vol. 2.

13. TREYBAL, Robert E. *Operaciones de transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1995. 858 p.
14. WALPOLE, Ronald, MYERS Raymond, MYRES, Sharon, YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8a ed. México: Pearson Educación, 2007. 840 p.
15. WARREN L., McCabe. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1 211 p.
16. WEBSTER, Allen L. *Estadística aplicada a los negocios y a la economía*. 3a ed. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 361 p.

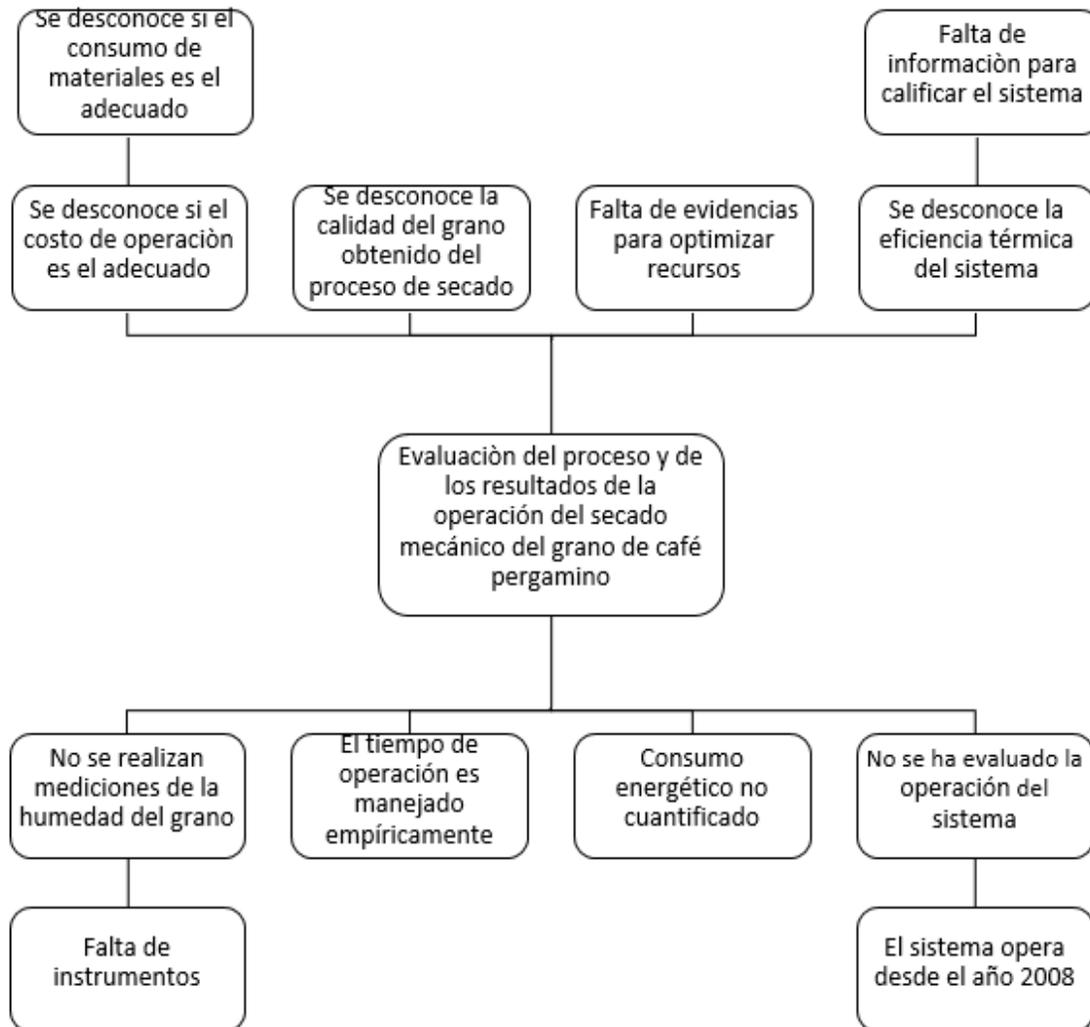
APÉNDICE

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Condiciones de temperatura y humedad relativa del aire y del grano de café durante el proceso de secado**

No.	Hora	Condiciones del aire					Condiciones del grano de café	
		Ambiente		Condición en guardiola				
				Entrada	Salida			
		$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$HR_{bh}(\%)$
0	13:00	23,9	69	45	24,5	82	73	47,5
1	14:00	23,6	71	45	24,9	84	76	47,0
2	15:00	23,1	73	45	25,3	84	76	46,5
3	16:00	22,8	73	45	25,6	87	76	45,9
4	17:00	21,3	84	45	24,9	94	76	45,4
5	18:00	21,2	79	45	25,5	90	77	44,9
6	19:00	20,6	86	45	25,6	94	77	44,6
7	20:00	20,6	86	45	26,1	94	78	44,0
8	21:00	19,7	85	45	25,7	94	78	43,5
9	22:00	19,0	77	45	25,6	93	78	43,5
10	23:00	18,7	81	45	24,9	92	78	42,6
11	00:00	18,3	83	45	24,7	95	78	42,2
12	01:00	17,8	82	45	24,4	96	78	42,2
13	02:00	17,4	79	45	23,9	93	78	41,2
14	03:00	16,8	74	45	23,7	91	78	41,0
15	04:00	16,7	68	45	22,6	89	79	40,7
16	05:00	16,4	60	45	22,4	88	79	40,4

Continuación apéndice 3.

No.	Hora	Condiciones del aire					Condiciones del grano de café	
		Ambiente		Condición en guardiola				
				Entrada	Salida			
		$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$HR_{bh}(\%)$
17	06:00	16,6	65	45	23,0	93	79	39,5
18	07:00	16,8	67	45	24,0	93	80	38,8
19	08:00	18,2	65	45	24,0	90	80	38,8
20	09:00	21,2	48	45	24,0	78	80	38,8
21	10:00	21,5	59	45	24,3	86	82	36,9
22	11:00	21,9	59	45	24,0	86	82	35,2
23	12:00	23,6	58	45	25,1	84	82	34,9
24	13:00	24,1	60	45	25,6	83	82	33,9
25	14:00	25,1	55	45	25,9	80	83	32,4
26	15:00	24,0	60	45	25,2	82	83	31,6
27	16:00	2,35	67	45	25,6	87	83	31,4
28	17:00	21,3	85	45	26,6	93	83	31,4
29	18:00	19,8	85	45	26,3	94	84	30,5
30	19:00	19,1	87	45	25,9	95	84	30,3
31	20:00	19,2	87	45	25,7	94	84	29,2
32	21:00	18,1	92	45	26,6	95	84	29,2
33	22:00	17,7	93	45	27,2	95	84	28,7
34	23:00	17,4	88	45	26,6	95	85	28,7
35	00:00	17,1	83	45	25,7	94	85	28,7

Continuación apéndice 3.

No,	Hora	Condiciones del aire					Condiciones del grano de café	
		Ambiente		Condición en guardiola				
				Entrada	Salida			
		<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T</i> (°C)	<i>HR_{bh}</i> (%)
36	01:00	15,8	90	45	25,6	94	86	28,7
37	02:00	15,9	88	45	24,6	95	86	28,2
38	03:00	16,4	85	45	24,7	95	86	28,2
39	04:00	16,8	82	45	24,4	95	86	28,0
40	05:00	17,7	77	45	24,4	95	86	27,5
41	06:00	17,6	81	45	24,1	95	86	27,1
42	07:00	16,9	77	45	23,7	94	86	27,0
43	08:00	17,3	77	45	24	93	87	26,5
44	09:00	19,8	71	45	23,7	89	87	25,8
45	10:00	21,0	68	45	24,5	90	87	25,8
46	11:00	21,0	72	45	24,6	88	88	25,2
47	12:00	22,0	72	45	25,2	88	88	22,9
48	13:00	24,0	64	45	27	76	88	21,5
49	14:00	21,4	73	45	25	87	88	20,5
50	15:00	20,7	77	45	25,6	81	88	19,4
51	16:00	20,5	79	45	26,8	93	88	18,4
52	17:00	19,7	87	45	27	94	88	18,0
53	18:00	19,8	84	45	26,8	96	88	18,0
54	19:00	19,5	86	45	26,3	94	88	17,5
55	20:00	19,4	83	45	26,9	88	89	17,5

Continuación apéndice 3.

No,	Hora	Condiciones del aire					Condiciones del grano de café	
		Ambiente		Condición en guardiola				
				Entrada	Salida			
		$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$HR(\%)$	$T(^{\circ}\text{F})$	$HR_{bh}(\%)$
51	16:00	20,5	79	45	26,8	93	88	18,4
52	17:00	19,7	87	45	27	94	88	18,0
53	18:00	19,8	84	45	26,8	96	88	18,0
54	19:00	19,5	86	45	26,3	94	88	17,5
55	20:00	19,4	83	45	26,9	88	89	17,5
56	21:00	18,3	90	45	26	89	89	16,8
57	22:00	17,9	87	45	26,4	89	89	16,8
58	23:00	17,2	91	45	26,4	93	90	16,1
59	00:00	16,5	87	45	25,7	95	90	15,8
60	01:00	16,3	84	45	26	95	91	15,8
61	02:00	16,5	88	45	24,8	94	91	15,8
62	03:00	16,1	83	45	24,6	95	92	15,7
63	04:00	17,0	80	45	24,9	93	92	15,6
64	05:00	17,6	79	45	25	96	92	15,6
65	06:00	17,7	77	45	24,6	94	92	14,0
66	07:00	17,9	77	45	23,8	94	92	12,9
67	08:00	18,5	73	45	25,9	91	93	12,7
68	09:00	19,4	69	45	27	86	94	12,7
69	10:00	20,2	66	45	26,4	86	94	12,5
70	11:00	20,4	67	45	25,9	89	96	12,5

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Especificaciones de guardiolas**

Característica	Valor	Unidad
Longitud	5,31	M
Diámetro	1,82	M
Capacidad	120	qq (12%)
Rotación	3,00	rev/min

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Humedad del grano de café en pergamino culminado el proceso de secado**

No, Muestra	Guardiola					
	1	2	3	4	5	6
1	12,5	12,7	11,8	12,1	11,5	12,4
2	12,4	12,4	12,4	11,6	12,6	12,6
3	12,1	11,8	12,6	12,1	12,6	11,7
4	12,3	12,4	11,7	12,3	12,1	12,1
5	11,7	12,4	12,4	12,1	12,4	12,2
6	12,3	11,7	12,6	11,7	12,1	12,8
7	12,4	11,4	12,1	11,5	12,1	12,4
8	11,9	12,1	11,9	12,1	12,4	11,9
9	12,1	12,1	12,2	12,4	11,7	11,4
10	11,7	12,3	12,1	12,4	11,8	12,1

Fuente: elaboración propia, empleando medidor de humedad de café.

Apéndice 6. Muestra de cálculo

- Conversión de grados Fahrenheit (°F) a grados Celsius (°C)

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} [T(^{\circ}\text{F}) - 32] \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

Donde:

$T(^{\circ}\text{C})$ = temperatura expresada en grados Celsius,

$T(^{\circ}\text{F})$ = temperatura expresada en grados Fahrenheit,

Ejemplo: se monitorea la temperatura de una muestra de café pergamino con un termómetro graduado en grados Fahrenheit, la lectura del termómetro es de 73 °F, expresar la temperatura de la muestra de café en grados Celsius.

Datos:

$$T(^{\circ}\text{F}) = 73 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Solución: se cuenta con la temperatura en grados Fahrenheit y se pide convertir esta temperatura a grados Celsius, para esto se sustituye la temperatura dada en la ecuación 1.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} [73 - 32]$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = 22,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Continuación apéndice 6

- Contenido de humedad en base húmeda a base seca

Considerando que el contenido de humedad en base húmeda es la relación entre la cantidad de agua y la masa del pergamino húmedo. Matemáticamente se puede escribir mediante la ecuación:

$$X_{bh} = \frac{m_{agua}}{m_{agua} + m_{pergamino\ seco}} \quad (2)$$

Donde:

X_{bh} = contenido de humedad en base húmeda

m_{agua} = masa de agua en el grano de café pergamino

$m_{pergamino\ seco}$ = masa del grano de café pergamino seco

Por otro lado, se sabe que el contenido de humedad en base seca se refiere a la proporción entre la cantidad de agua y la masa del grano de café pergamino seco. Esta proporción se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{m_{agua}}{m_{pergamino\ seco}} \quad (3)$$

Donde:

X = contenido de humedad en base seca

Continuación apéndice 6.

Para determinar el contenido de humedad en base seca en función del contenido de humedad en base húmeda se requiere una manipulación algebraica para expresar una variable en términos de la otra como se expone a continuación:

Despejando $m_{\text{pergamino seco}}$ de la ecuación 2,

$$m_{\text{pergamino seco}} = \frac{m_{\text{agua}}(1 - X_{bh})}{X_{bh}} \quad (4)$$

Sustituyendo 4 en 3 y simplificando se obtiene la ecuación que expresa el contenido de humedad en base seca en términos del contenido de humedad en base húmeda,

$$X = \frac{X_{bh}}{1 - X_{bh}} \left[\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } SS} \right] \quad (5)$$

Donde:

X_{bh} = contenido de humedad en base húmeda

X_{bs} = contenido de humedad en base seca

Ejemplo: se extrae una muestra de café pergamino que se encuentra en un proceso de secado mecánico y se procede a medir el contenido de humedad obteniendo una lectura de 47,5 % (0,475 kg agua /kg pergamino húmedo). Con la finalidad de analizar el comportamiento del proceso de secado se desean realizar las curvas de secado del grano de café en pergamino para lo cual se requiere que el contenido de humedad del grano se encuentre en base seca.

Continuación apéndice 6.

Datos:

$$X_{bh} = 0,475 \text{ kg agua / kg pergamino húmedo}$$

Solución: el inconveniente con la humedad es que esta se encuentra expresada en base húmeda, Para expresar la humedad del grano sobre una base seca basta únicamente con sustituir la humedad en base húmeda en la ecuación 5 y evaluar.

$$X = \frac{0,475}{1 - 0,475}$$
$$X = 0,906 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg pergamino seco}}$$

- Área superficial del secador cilíndrico

$$A_s = \pi DL \quad [m^2] \quad (6)$$

Donde:

A_s = área superficial del secador

D = diámetro del cilindro en m

L = longitud del cilindro en m

Ejemplo: una serie de cilindros rotatorios son utilizados en el proceso de secado de café pergamino, Las dimensiones de cada equipo son: 5,35 m de longitud y 1,82 m de diámetro, ¿Cuál es el área superficial de un cilindro?

Continuación apéndice 6.

No considerar las caras frontal y trasera del cilindro.

Datos:

$$D = 5,35 \text{ m}$$

$$L = 1,82 \text{ m}$$

Solución: utilizando la ecuación 6 y evaluando los datos de diámetro y longitud proporcionado se determina de manera fácil el área superficial del cilindro:

$$A_s = \pi * 5,35 \text{ m} * 1,82 \text{ m}$$

$$A_s = 30,6 \text{ m}^2$$

- Masa del sólido seco

Según el registro de lotes anteriores, la capacidad de almacenamiento de cada secador (guardiola) es de 120 quintales de café pergamino al 12 % en base húmeda; con estos datos se procede a calcular un estimado de café pergamino completamente seco obtenido en cada una de las guardiolas.

Según lo expuesto previamente, el 12 % del contenido en una guardiola es agua lo que indica que el 88 % es estrictamente pergamino seco; por lo tanto, la masa de pergamino seco en cada una de las guardiolas es:

$$m_{\text{pergamino seco}} = 0,88 (120 \text{ qq})$$

$$m_{\text{pergamino seco}} = 105,6 \text{ qq}$$

Continuación apéndice 6.

Utilizando las equivalencias siguientes:

$$1 \text{ qq} = 100 \text{ lb}$$

$$1 \text{ kg} = 2,2 \text{ lb}$$

La masa de pergamino seco por guardiola es:

$$m_{\text{pergamino seco}} = 105,6 \text{ qq} * \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ qq}} * \frac{1 \text{ kg}}{2,2 \text{ lb}}$$

$$m_{\text{pergamino seco}} = 4\ 800 \text{ kg/guardiola}$$

El sistema de secado está conformado por 6 guardiolas, si se conoce que una guardiola contiene 4 800 kg de pergamino seco, entonces la masa de pergamino seco de un lote que se extrae de las 6 guardiolas funcionando simultáneamente es de 28 800 kg de pergamino seco.

- Velocidad de secado

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \left[\frac{\text{kg agua}}{\text{h m}^2} \right] \quad (7)$$

Donde:

R = velocidad de secado

L_s = masa de un lote de pergamino seco en kg

A = área superficial del cilindro

$\frac{dX}{dt}$ = derivada del contenido de humedad respecto del tiempo

Continuación apéndice 6.

Ejemplo: en el estudio realizado sobre curvas de secado de granos de café pergamino, se grafican los pares ordenados (t,X) obtenidos de la experimentación. Mediante el uso de Software se obtiene el modelo matemático que predice el comportamiento del contenido de humedad en función del tiempo:

Periodo de velocidad constante: $X = -0,0142t + 0,8906$, $0 \leq t \leq 20$

Periodo de velocidad decreciente:

$$X = 8,01 \times 10^{-5}t^2 - 0,0161t + 0,841, \quad 21 \leq t \leq 70$$

Derivando los modelos respecto del tiempo:

$$\frac{dX}{dt} = -0,0142 \quad (8)$$

$$\frac{dX}{dt} = 1,60 \times 10^{-4}t - 0,0161 \quad (9)$$

Mediante los modelos descritos, se determina la velocidad de secado a las 10 horas y 30 horas de iniciado el proceso de secamiento.

- Velocidad de secado para $t = 10$ horas

Para ello tomaremos como base un cilindro, de esto se sabe que $A = 30,6 \text{ m}^2$ y $L_s = 4\ 800 \text{ kg}$, Para esta situación se utiliza el modelo 1 de velocidad constante, ecuación 8, debido a que el rango de operación de este es de 0 a 20 horas, Sustituyendo los datos en la ecuación 7 se tiene:

Continuación apéndice 6.

$$R(t = 10) = -\frac{4\,800 \text{ kg pergamino seco}}{30,6 \text{ m}^2} (-0,0142) \frac{\text{kg agua}}{\text{h kg pergamino seco}}$$

$$R(t = 10) = 2,23 \frac{\text{kg agua}}{\text{h m}^2}$$

- Velocidad de secado para $t = 30$ horas

En esta situación el modelo a utilizar es el modelo descrito para el periodo de velocidad decreciente, ecuación 9, cuyo rango de acción es $21 \leq t \leq 70$ horas. Sustituyendo valores y el modelo correspondiente en la ecuación 7:

$$R(t = 30) = -\frac{4\,800 \text{ kg pergamino seco}}{30,6 \text{ m}^2} (1,60 \times 10^4 * 30 - 0,0161) \frac{\text{kg agua}}{\text{h pergamino seco}}$$

$$R(t) = 1,77 \frac{\text{kg agua}}{\text{h m}^2}$$

- Consumo energético

El consumo energético del proceso del secado de un lote es relativamente debido al consumo de energía eléctrica de los motores y a la energía proporcionada por la leña.

- Energía eléctrica

La energía consumida por un motor eléctrico se calcula como el producto de la potencia consumida de la red eléctrica por el tiempo de funcionamiento.

Continuación apéndice 6.

$$E_{motor} = P_{int}t \quad (kJ) \quad (10)$$

Donde:

E_{motor} = energía eléctrica consumida por un motor en kJ

P_{int} = potencia consumida por un motor en kW=kJ/s

t = tiempo en horas (s)

El consumo de potencia del motor se determina mediante la eficiencia de operación del motor y la potencia de salida del motor:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{int}} \quad (11)$$

Donde:

η = eficiencia del motor

P_{out} = potencia entregada por el motor

P_{int} = potencia consumida por el motor

Nota: los datos de eficiencia y potencia entrega por el motor se obtienen de la placa del fabricante.

Sustituyendo la ecuación 11 y la equivalencia 1 h = 3 600 s en la ecuación 10 se obtiene la expresión deseada para calcular el consumo energético de un motor:

Continuación apéndice 6.

$$E_{motor} = 3\,600 \frac{P_{out} t}{\eta} \quad (12)$$

Ejemplo: calcular el consumo energético de un motor eléctrico que opera durante 70 horas, La eficiencia y potencia de salida del motor según el fabricante son 0,88 y 3,7 kW respectivamente.

Datos:

$$\eta = 0,88$$

$$P_{out} = 3,7 \text{ kW}$$

$$t = 70 \text{ h}$$

Solución: se cuenta con los datos de la placa del motor, con esto es suficiente para calcular el consumo energético utilizando la ecuación 12.

$$E_{motor} = \frac{3\,600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{3,7 \text{ kW} * 70 \text{ h}}{0,88}$$

$$E_{motor} = 1\,059\,545,45 \text{ kJ}$$

- Energía suministrada por la leña

La leña utilizada en el proceso de secamiento regularmente es leña de gravilea robusta, Conociendo el tipo de leña utilizada se puede cuantificar la energía calórica aportada por esta a través de sus propiedades.

$$E_{leña} = M * PC \quad (13)$$

Continuación apéndice 6.

Donde:

$E_{leña}$ = energía suministrada por la leña en kJ

M = masa de leña consumida en kg

PC = poder calorífico de la leña en kJ/kg

El consumo de leña se registra por tareas, por tanto, es necesario convertir este consumo a volumen y por la relación de la densidad, masa y volumen se procede a expresar el consumo de leña en masa.

La geometría de una tarea de leña es un paralelepípedo con dimensiones: 1 vr x 4 vr x 1 vr. Para expresar estas dimensiones en el SI se utiliza la equivalencia:

$$1 \text{ vr} = 0,836 \text{ m}$$

Como la geometría de una tarea de leña es un paralelepípedo, el volumen de este viene dado por:

$$V = blh \text{ [m}^3\text{]} \quad (14)$$

Donde:

V = volumen ocupado por una tarea de leña

b = base del paralelepípedo

l = largo de paralelepípedo

h = altura del paralelepípedo

Aplicando la ecuación 14

Continuación apéndice 6.

$$V = (0,836 \text{ m})(4 * 0,836 \text{ m})(0,836 \text{ m})$$

$$V = 1,40 \text{ m}^3$$

Por tanto, 1 tarea de leña ocupa un volumen de 1,40 m³, entonces el volumen ocupado por n tareas de leña viene dado por:

$$V = 1,40 n \quad (15)$$

Donde:

n = número de tareas de leña

Por definición se sabe que la densidad es igual a la masa contenida en una unidad de volumen:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (16)$$

Donde:

ρ = densidad en kg/m³

Sustituyendo las ecuaciones 15 y 16 en ecuación 13:

$$E_{leña} = 1,40 n \rho PC \quad (17)$$

En el proceso de secamiento de café se utiliza leña de gravilea robusta como combustible.

Continuación apéndice 6.

Si se tiene un consumo promedio de 0,45 tarea/h y la caldera opera durante 70,75 horas, además, de las propiedades de la leña se sabe que el poder calorífico y la densidad son 18 945,15 kJ/kg y 577 kg/m³ respectivamente ¿Cuál es la energía suministrada por la leña durante el proceso?

Datos:

$$n = 31,84 \text{ tarea}$$

$$t = 70,75 \text{ h}$$

$$PC = 18\,945,15 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho = 577 \text{ kg/m}^3$$

Solución: evaluando los datos en la ecuación 17 se obtiene:

$$E_{leña} = 1,40 \frac{m^3}{tarea} * 31,84 \text{ tarea} * 577 \frac{kg}{m^3} * 18\,945,15 \frac{kJ}{kg}$$

$$E_{leña} = 487\,275\,978,13 \text{ kJ}$$

- Consumo energético total

$$E_{total} = E_{leña} + \sum E_{motor} \quad (17)$$

De la tabla XXII se tiene que el consumo energético por el total de los motores en el secamiento de un lote es de 3 708 065, 46 kJ, por tanto, el consumo energético total en el secamiento de un lote de café pergamino es:

Continuación apéndice 6.

$$E_{total} = 487\,275\,978,13\text{ kJ} + 3\,708\,065,46\text{ kJ}$$

$$E_{total} = 490\,984\,043,60\text{ kJ}$$

- Eficiencia térmica

$$\eta_{ter} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{suministrado}}} * 100\% \quad (18)$$

Donde:

η_{ter} = eficiencia térmica

Q_{util} = energía utilizada para el secado del grano en kJ

$Q_{suministrado}$ = calor suministrado por la leña en kJ

- Calor útil

Calor aprovechado en el proceso para efectos del secado del grano, sus funciones son:

- Calentar el grano el grano de café pergamino seco de su temperatura inicial hasta su temperatura final.
- Calentar el contenido de agua del grano hasta su temperatura de vaporización.
- Evaporar el líquido.

Continuación apéndice 6.

- Calentar el contenido de agua remante en el grano hasta la temperatura final del grano.
- Elevar la temperatura de la cantidad de agua evaporada hasta su temperatura final.

$$Q_{\text{útil}} = L_s [c_{ps}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a c_{pL}(T_v - T_{sa}) + (X_a - X_b)\lambda + X_b c_{pL}(T_{sb} - T_v) + (X_a - X_b)c_{pv}(T_{va} - T_v)] \quad (19)$$

Donde:

L_s = masa del lote de café pergamino seco

c_{ps} = calor específico del grano de café pergamino

c_{pL} = calor específico del agua líquida

c_{pv} = calor específico del vapor de agua

T_{sb} = temperatura final del grano de café pergamino

T_{sa} = temperatura inicial del grano de café pergamino

T_v = temperatura de vaporización

T_{va} = temperatura final del vapor

X_a = contenido de humedad inicial del grano de café en base
seca

X_b = contenido de humedad final del grano de café en base seca

λ = calor latente de vaporización

Continuación apéndice 6.

Para determinar el calor útil para el secado, se evaluará cada una de las propiedades de la ecuación 19 en el promedio de los datos registrados durante la experimentación.

- Calor específico del grano de café en pergamino

$$c_{ps} = 1,3556 + 5,7859X \quad (20)$$

Donde:

X = contenido de humedad del grano de pergamino en base seca.

Para el grano de pergamino seco, el contenido de humedad es cero

Entonces:

$$c_{ps} = 1,3556 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

- Calor específico del agua líquida

Esta propiedad será evaluada a la temperatura promedio del grano de café pergamino en el proceso de secado.

$$\bar{T} = \frac{T_{sa} + T_{sb}}{2} \text{ [}^\circ C \text{]} \quad (21)$$

Continuación apéndice 6.

Donde:

\bar{T} = temperatura media del grano de café pergamino

T_{sa} = temperatura inicial del grano

T_{sb} = temperatura final del grano

Las temperatura inicial y final del grano de café pergamino en el proceso de secamiento son 22,8 °C y 35,6 °C, la temperatura promedio es:

$$\bar{T} = \frac{22,8 \text{ °C} + 35,6 \text{ °C}}{2}$$
$$\bar{T} = 29,2 \text{ °C}$$

Según la tabla XXVII de propiedades del agua, el calor específico del agua a 29,2 °C es aproximadamente 4,18 kJ/kg °C.

- Calor específico del vapor

Como la temperatura del aire a la salida de las guardiolas oscila en los 25 °C, el calor específico del vapor se evalúa a esta temperatura

$$c_{pv} = 1,87 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

- Temperatura de vaporización

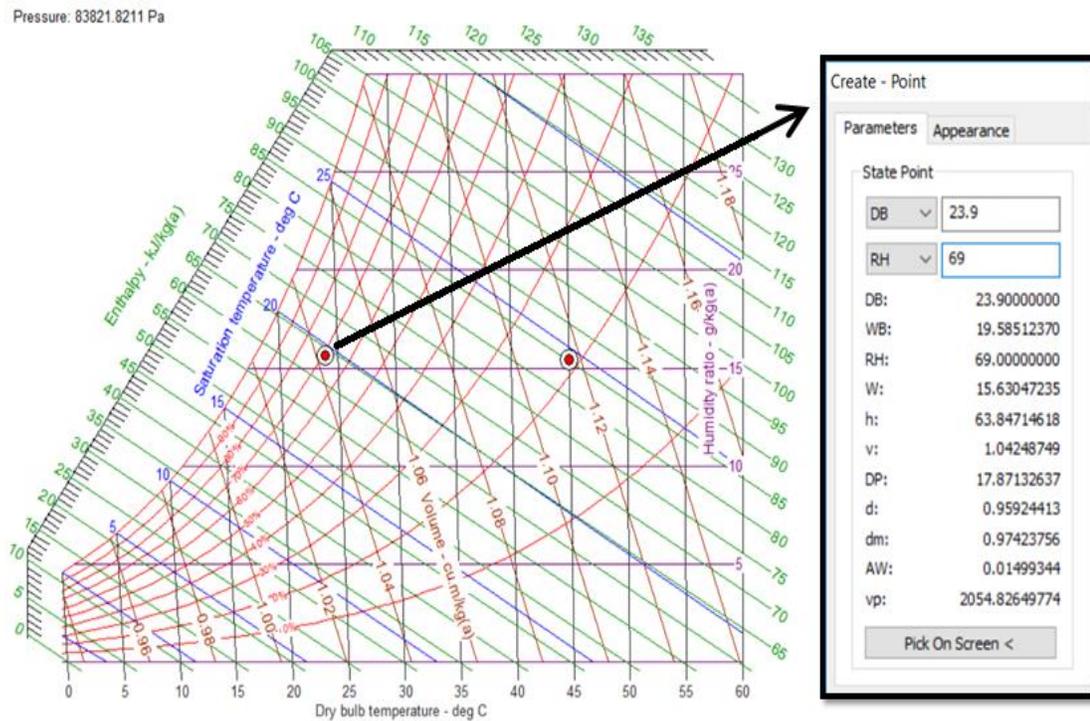
La temperatura de vaporización se consideró como la temperatura de bulbo húmedo a la temperatura y humedad del aire a la entrada de la guardiola.

Continuación apéndice 6.

Para determinar la temperatura del bulbo húmedo se utilizó la carta psicrométrica del aire del municipio de Acatenango.

Para conocer la temperatura de vaporización, se determinó la humedad específica del aire del ambiente con las condiciones de humedad y temperatura del ambiente registrados durante la experimentación:

Identificación de la humedad específica en la carta psicrométrica a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire

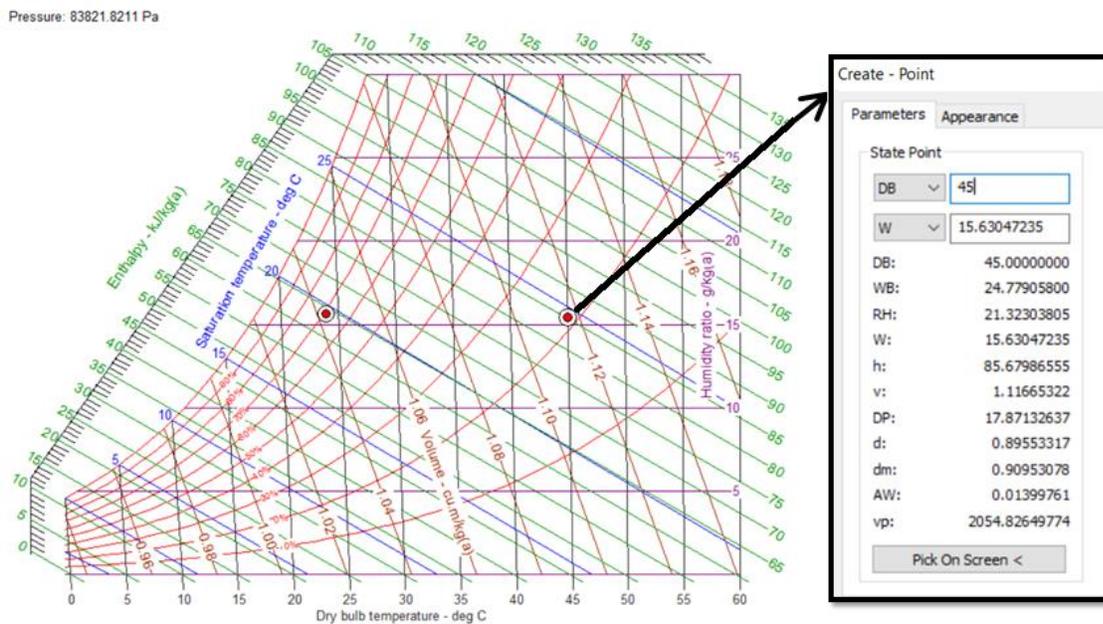


Fuente: elaboración propia, empleando STYSoft Psychrometric Chat 2.2Demo.

Continuación apéndice 6.

En el proceso de calentamiento del aire se considera que la humedad específica se mantiene constante, con este dato y la temperatura registrada del aire a la entrada de la guardiola se determina la temperatura de bulbo húmedo del aire mediante la carta psicrométrica.

Identificación de propiedades del aire sobre la carta psicrométrica



Fuente: elaboración propia, empleando STYSoft Psychrometric Chat 2.2Demo.

Como se observa en la figura, para la humedad específica de 15,63 g/kg y temperatura de bulbo seco de 45 °C. la temperatura de bulbo húmedo es de 24,78 °C.

Continuación apéndice 6.

- Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización es evaluado a la temperatura de vaporización la cual está representada por la temperatura de bulbo húmedo, Por tanto, el calor latente de vaporización será determinado a la temperatura promedio de bulbo húmedo.

Según la tabla XXI la temperatura promedio de bulbo húmedo es 23,4 °C, De acuerdo con la tabla XXVIII el calor latente de respectivamente, Interpolando estas parejas ordenadas es posible determinar el calor latente de vaporización a la temperatura de 23,4 °C, vaporización para las temperaturas de 20 y 25 °C es 2 454 y 2 442 kJ/kg.

$$\lambda(T) = \left(\frac{T_2 - T}{T_2 - T_1}\right) \lambda_1 + \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1}\right) \lambda_2 \quad (22)$$

Donde:

$\lambda(T)$ = calor latente de vaporización a la temperatura deseada T

λ_1 = calor latente de vaporización a la temperatura T₁

λ_2 = calor latente de vaporización de la temperatura T₂

Si $\lambda(20\text{ °C}) = 2\,454\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, $\lambda(25\text{ °C}) = 2\,442\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$,

$$\lambda(T) = \left(\frac{25\text{ °C} - 23,4\text{ °C}}{25\text{ °C} - 20\text{ °C}}\right) * 2\,454\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(\frac{23,4\text{ °C} - 20\text{ °C}}{25\text{ °C} - 20\text{ °C}}\right) * 2\,442\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$\lambda(23,4\text{ °C}) = 2\,445,8\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Continuación apéndice 6.

- Cálculo del calor útil

Evaluando los datos correspondientes en la ecuación 19 se tiene:

$$Q_{\text{útil}} = 28\,800[1,3556(35,6 - 22,8) + 0,906 * 4,18(23,4 - 22,8) \\ + 2\,445,8 (0,906 - 0,143) + 0,143 * 4,18(35,6 - 23,4) \\ + 1,87(0,906 - 0,143)(25,2 - 23,4)]$$

$$Q_{\text{útil}} = 54\,592\,891,95 \text{ kJ}$$

- Cálculo de la eficiencia térmica

Reemplazando los resultados calculados de calor útil y calor suministrado en la ecuación 18 se obtiene,

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{54\,592\,891,95 \text{ kJ}}{487\,275\,978,13 \text{ kJ}} * 100\%$$

$$\eta_{\text{ter}} = 11,2 \%$$

- Costo económico de la operación de secado

El costo de la operación de secado incurre básicamente en el costo del consumo energético de los motores y el costo de la leña consumida.

Continuación apéndice 6.

- Consto del consumo eléctrico

$$Costo_{electrico} = T * \sum_i n_i (P_{int})_i * t_i [Q,] \quad (23)$$

Donde:

T = tarifa (Q, 2,086856 /kWh)

$(P_{int})_i$ = potencia consumida por el motor i

t_i = tiempo de operación del motor i

n_i = cantidad de motores i

Para expresar el costo eléctrico en términos de la potencia entregada y la eficiencia del motor, que son los datos proporcionados por el fabricante; basta con sustituir la ecuación 11 en 23.

$$Costo_{eléctrico} = T * \sum_i n_i * \frac{(P_{out})_i}{\eta_i} * t_i [Q] \quad (24)$$

Donde:

$(P_{out})_i$ = potencia de entrega del motor i

η_i = eficiencia de operación del motor i

Según la tabla XXII el costo eléctrico total demandado en el secado de un lote de café pergamino es:

$$Costo_{eléctrico} = Q,9\ 661,94$$

Continuación apéndice 6.

- Costo por consumo de leña

$$Costo_{leña} = n * P \quad [Q] \quad (25)$$

Donde:

n = cantidad de tareas de leña consumidas

P = Costo de una tarea de leña (Q, 100 / tarea)

Si el proceso de secado demandó un consumo de 31,84 tareas de leña, el costo total es:

$$Costo_{leña} = 31,84 \text{ tarea} * \frac{Q, 100,00}{\text{tarea}}$$
$$Costo_{leña} = Q, 3 184,00$$

- Costo de la operación de secado

$$Costo_{Total} = Costo_{leña} + Costo_{eléctrico} \quad (26)$$

$$Costo_{Total} = Q, 3 184,00 + Q, 9 661,94$$

$$Costo_{Total} = Q, 12 845,94$$

- Tiempo óptimo de secado

El tiempo óptimo de secado ideal bajo las condiciones en que se efectuó el secado se determina mediante la ecuación,

Continuación apéndice 6.

$$R(X) = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (27)$$

Reacomodando los términos de la ecuación 27 para el tiempo, se tiene:

$$dt = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{R(X)} \quad (28)$$

Donde:

$R(X)$ = velocidad de secado en función del contenido de humedad, integrando ambos miembros de la ecuación 28 y haciendo $t_o = 0$ se obtiene una expresión para calcular el tiempo óptimo de secado desde X_a hasta X_d ,

$$t_{op} = -\frac{L_s}{A} \int_{X_a}^{X_d} \frac{dX}{R(X)} \quad (29)$$

Donde:

X_d = contenido de humedad deseado

t_{op} = tiempo óptimo para obtener el contenido de humedad deseado

Considerando que la velocidad de secado se desarrolla en dos periodos, de velocidad constante desde X_a hasta X_c y de velocidad decreciente desde X_c hasta X_d , la ecuación 29 se expande de la forma siguiente:

$$t_{op} = -\frac{L_s}{A} \left[\int_{X_a}^{X_c} \frac{dX}{R_1(X)} + \int_{X_c}^{X_d} \frac{dX}{R_2(X)} \right] \quad (30)$$

Continuación apéndice 6.

Donde:

$R_1(X)$ = velocidad de secado en el periodo de velocidad constante

$R_2(X)$ = velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente

De acuerdo con la gráfica de la figura IV de la sección de resultados, el modelo la velocidad de secado para cada periodo en términos del contenido de humedad es:

$$R_1(X) = 2,23 \quad (31)$$

$$R_2(X) = -1,62X^2 + 3,94X + 0,323 \quad (32)$$

Reemplazando 31 y 32 en 30:

$$t_{op} = -\frac{L_s}{A} \left[\int_{X_a}^{X_c} \frac{dX}{2,23} + \int_{X_c}^{X_d} \frac{dX}{-1,62X^2 + 3,94X + 0,323} \right] \quad (33)$$

Considerando que $X_a = 0,906$; $X_c = 0,635$ y que el contenido de humedad deseado es del 12% en base húmeda ($X_d = 0,136$).

$$t_{op} = -\frac{4\,800}{30,6} \left[\int_{0,906}^{0,635} \frac{dX}{2,23} + \int_{0,635}^{0,136} \frac{dX}{-1,62X^2 + 3,94X + 0,323} \right]$$

$$t_{op} = -\frac{4\,800}{30,6} [-0,122 - 0,342]$$

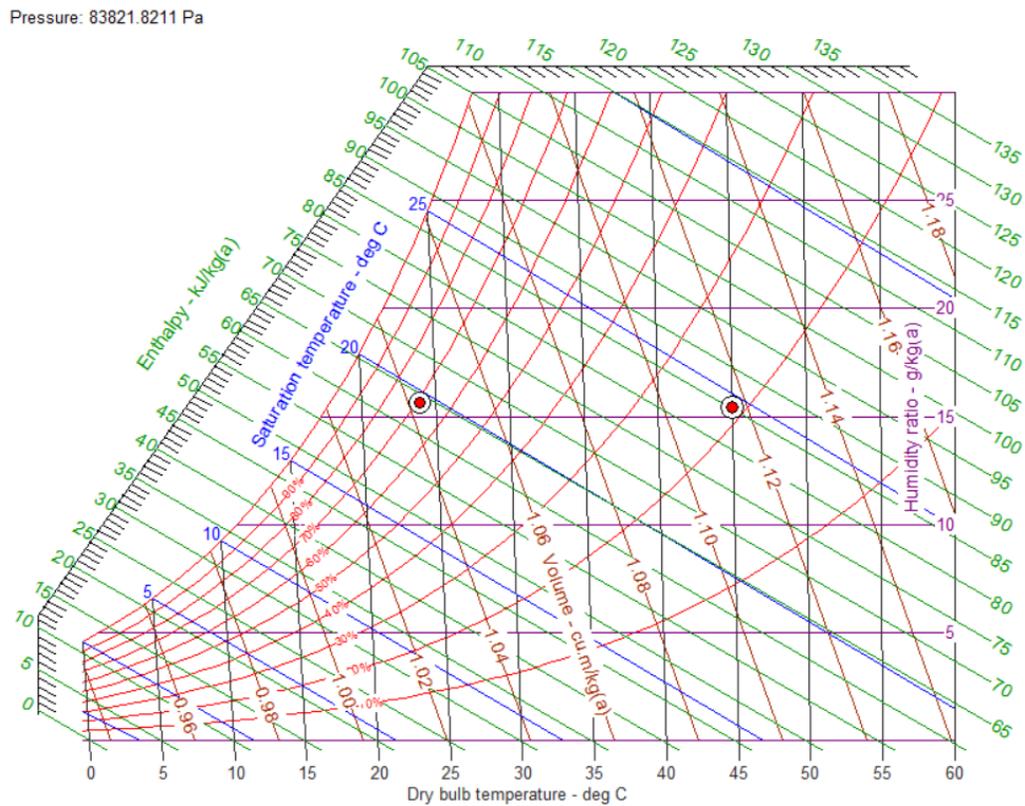
$$t_{op} = 72,78 \text{ h}$$

Continuación apéndice 6.

El tiempo óptimo, según las condiciones en que se efectuó el secado es de 72 horas con 47 minutos.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Carta psicrométrica de las propiedades del aire del municipio de Acatenango



Fuente: elaboración propia, empleando STYSoft Psychrometric Chart 2.2Demo.

Apéndice 8. Tabulación de datos del grano de café y velocidad de secado

No.	Hora	T (°C)	Contenido de humedad		HR _{bs} (%)	R $\frac{kg\ agua}{hm^2}$
			X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ humedo}$	X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ seco}$		
0	13:00	22,8	0,475	0,906	90,6	2,23
1	14:00	24,4	0,470	0,887	88,7	2,23
2	15:00	24,4	0,465	0,868	86,8	2,23
3	16:00	24,4	0,459	0,850	85,0	2,23
4	17:00	24,4	0,454	0,832	83,2	2,23
5	18:00	25,0	0,449	0,815	81,5	2,23
6	19:00	25,0	0,446	0,805	80,5	2,23
7	20:00	25,6	0,440	0,785	78,5	2,23
8	21:00	25,6	0,435	0,771	77,1	2,23
9	22:00	25,6	0,435	0,771	77,1	2,23
10	23:00	25,6	0,426	0,743	74,3	2,23
11	00:00	25,6	0,422	0,731	73,1	2,23
12	01:00	25,6	0,422	0,731	73,1	2,23
13	02:00	25,6	0,412	0,701	70,1	2,23
14	03:00	25,6	0,410	0,694	69,4	2,23
15	04:00	26,1	0,407	0,688	68,8	2,23
16	05:00	26,1	0,404	0,678	67,8	2,23
17	06:00	26,1	0,395	0,654	65,4	2,23

Continuación apéndice 8.

No.	Hora	T (°C)	Contenido de humedad		HR _{bs} (%)	R $\frac{kg\ agua}{hm^2}$
			X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ humedo}$	X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ seco}$		
18	07:00	26,7	0,388	0,635	63,5	2,23
19	08:00	26,7	0,388	0,635	63,5	2,23
20	09:00	26,7	0,388	0,635	63,5	2,23
21	10:00	27,8	0,369	0,586	58,6	2,00
22	11:00	27,8	0,352	0,544	54,4	1,97
23	12:00	27,8	0,349	0,535	53,5	1,95
24	13:00	27,8	0,339	0,512	51,2	1,92
25	14:00	28,3	0,324	0,478	47,8	1,90
26	15:00	28,3	0,316	0,463	46,3	1,87
27	16:00	28,3	0,314	0,457	45,7	1,85
28	17:00	28,3	0,314	0,457	45,7	1,82
29	18:00	28,9	0,305	0,438	43,8	1,80
30	19:00	28,9	0,303	0,435	43,5	1,77
31	20:00	28,9	0,292	0,412	41,2	1,75
32	21:00	28,9	0,292	0,412	41,2	1,72
33	22:00	28,9	0,287	0,402	40,2	1,70
34	23:00	29,4	0,287	0,402	40,2	1,67
35	00:00	29,4	0,287	0,402	40,2	1,65
36	01:00	30,0	0,287	0,402	40,2	1,62
37	02:00	30,0	0,282	0,392	39,2	1,60

Continuación apéndice 8.

No.	Hora	T (°C)	Contenido de humedad		HR _{bs} (%)	R <i>kg agua</i> <i>hm²</i>
			X_{bh} <i>kg agua</i> <i>kg pergamino humedo</i>	X_{bh} <i>kg agua</i> <i>kg pergamino seco</i>		
38	03:00	30,0	0,282	0,392	39,2	1,57
39	04:00	30,0	0,280	0,389	38,9	1,55
40	05:00	30,0	0,275	0,380	38,0	1,52
41	06:00	30,0	0,271	0,372	37,2	1,50
42	07:00	30,0	0,270	0,370	37,0	1,47
43	08:00	30,6	0,265	0,361	36,1	1,45
44	09:00	30,6	0,258	0,348	34,8	1,42
45	10:00	30,6	0,258	0,347	34,7	1,40
46	11:00	31,1	0,252	0,337	33,7	1,37
47	12:00	31,1	0,229	0,297	29,7	1,35
48	13:00	31,1	0,215	0,274	27,4	1,32
49	14:00	31,1	0,205	0,259	25,9	1,30
50	15:00	31,1	0,194	0,241	24,1	1,27
51	16:00	31,1	0,184	0,226	22,6	1,25
52	17:00	31,1	0,180	0,219	21,9	1,22
53	18:00	31,1	0,180	0,219	21,9	1,20
54	19:00	31,1	0,175	0,212	21,2	1,17
55	20:00	31,7	0,175	0,212	21,2	1,15
56	21:00	31,7	0,168	0,202	20,2	1,12
57	22:00	31,7	0,168	0,202	20,2	1,10
58	23:00	32,2	0,161	0,192	19,2	1,07

Continuación apéndice 8.

No	Hora	T (°C)	Contenido de humedad		HR _{bs} (%)	R $\frac{kg\ agua}{hm^2}$
			X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ humedo}$	X_{bh} $\frac{kg\ agua}{kg\ pergamino\ seco}$		
59	00:00	32,2	0,158	0,188	18,8	1,05
60	01:00	32,8	0,158	0,188	18,8	1,02
61	02:00	32,8	0,158	0,188	18,8	0,99
62	03:00	33,3	0,157	0,186	18,6	0,97
63	04:00	33,3	0,156	0,184	18,4	0,94
64	05:00	33,3	0,156	0,184	18,4	0,92
65	06:00	33,3	0,140	0,162	16,2	0,89
66	07:00	33,3	0,129	0,147	14,7	0,87
67	08:00	33,9	0,127	0,145	14,5	0,84
68	09:00	34,4	0,127	0,145	14,5	0,82
69	10:00	34,4	0,125	0,143	14,3	0,79
70	11:00	35,6	0,125	0,143	14,3	0,77

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Condiciones del aire del ambiente y del aire que ingresa a la guardiola. Uso de la carta psicrométrica**

Aire de ambiente			Entrada a guardiola		
<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>W</i> $\left(\frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire}}\right)$	<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T_{bh}</i> (°C)
23,9	69	15,6	45,0	21,3	24,8
23,6	71	15,8	45,0	21,6	24,9
23,1	73	15,8	45,0	21,5	24,9
22,8	73	15,5	45,0	21,1	24,7
21,3	84	16,3	45,0	22,2	25,1
21,2	79	15,2	45,0	20,7	24,5
20,6	86	15,9	45,0	21,7	24,9
20,6	86	15,9	45,0	21,7	24,9
19,7	85	14,9	45,0	20,3	24,4
19,0	77	12,9	45,0	17,6	23,3
18,7	81	13,3	45,0	18,2	23,5
18,3	83	13,3	45,0	18,2	23,5
17,8	82	12,7	45,0	17,4	23,2
17,4	79	11,9	45,0	16,4	22,7
16,8	74	10,7	45,0	14,7	22,0
16,7	68	9,8	45,0	13,5	21,4
16,4	60	8,5	45,0	11,7	20,6
16,6	65	9,3	45,0	12,8	21,1
16,8	67	9,7	45,0	13,4	21,4
18,2	65	10,3	45,0	14,2	21,7

Continuación apéndice 9.

Aire de ambiente			Entrada a guardiola		
<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>W</i> $\left(\frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire}}\right)$	<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T_{bh}</i> (°C)
21,2	58	11,1	45,0	15,2	22,2
21,5	59	11,5	45,0	15,8	22,5
21,9	59	11,8	45,0	16,2	22,6
23,6	58	12,9	45,0	17,6	23,3
24,1	60	13,7	45,0	18,8	23,7
25,1	55	13,3	45,0	18,3	23,5
24,0	60	13,6	45,0	18,7	23,7
23,5	67	14,8	45,0	20,2	24,3
21,3	85	16,5	45,0	22,4	25,2
19,8	85	15,0	45,0	20,5	24,4
19,1	87	14,7	45,0	20,0	24,3
19,2	87	14,8	45,0	20,2	24,3
18,1	92	14,6	45,0	19,9	24,2
17,7	93	14,4	45,0	19,6	24,1
17,4	88	13,3	45,0	18,2	23,5
17,1	83	12,3	45,0	16,9	22,9
15,8	90	12,3	45,0	16,8	22,9
15,9	88	12,1	45,0	16,6	22,8
16,4	85	12,0	45,0	16,5	22,8
16,8	82	11,9	45,0	16,3	22,7
17,7	77	11,8	45,0	16,2	22,7

Continuación apéndice 9.

Aire de ambiente			Entrada a guardiola		
<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>W</i> $\left(\frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire}}\right)$	<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T_{bh}</i> (°C)
17,6	81	12,4	45,0	17,0	23,0
16,9	77	11,2	45,0	15,4	22,3
17,3	77	11,5	45,0	15,8	22,5
19,8	71	12,5	45,0	17,1	23,0
21,0	68	12,9	45,0	17,6	23,3
21,0	72	13,6	45,0	18,7	23,7
22,0	72	14,5	45,0	19,8	24,2
24,0	64	14,6	45,0	19,9	24,2
21,4	73	14,2	45,0	19,4	24,0
20,7	77	14,3	45,0	19,6	24,1
20,5	79	14,5	45,0	19,9	24,2
19,7	87	15,2	45,0	20,8	24,6
19,8	84	14,8	45,0	20,2	24,3
19,5	86	14,9	45,0	20,3	24,4
19,5	86	14,9	45,0	20,3	24,4
19,4	83	14,3	45,0	19,5	24,0
18,3	90	14,4	45,0	19,7	24,1
17,9	87	13,6	45,0	18,6	23,7
17,2	91	13,6	45,0	18,6	23,7
16,5	87	12,4	45,0	17,0	23,0

Continuación apéndice 9.

Aire de ambiente			Entrada a guardiola		
<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>W</i> $\left(\frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire}}\right)$	<i>T</i> (°C)	<i>HR</i> (%)	<i>T_{bh}</i> (°C)
16,1	83	11,5	45,0	15,8	22,5
17,0	80	11,8	45,0	16,1	22,6
17,6	79	12,1	45,0	16,6	22,8
17,7	77	11,8	45,0	16,2	22,7
17,9	77	12,0	45,0	16,5	22,8
18,5	73	11,8	45,0	16,2	22,7
19,4	69	11,8	45,0	16,2	22,7
20,2	66	11,9	45,0	16,3	22,7
20,4	67	12,2	45,0	16,7	22,9

Fuente: elaboración propia, empleando la carta psicrométrica.

Apéndice 10. **Costo del consumo energético de los motores eléctricos**

Equipo impulsado por motor	Cantidad de motores	P_{out} (kW)	η	t (h)	E_{motor} (kJ)	Consumo (kW, h)	Costo (Q,)
Guardiola	6	3,7	0,88	70,00	6 357 272,73	1 765,91	3685,20
Ventilador	6	5,5	0,91	70,00	9 138 461,54	2 538,46	5297,40
Caldera	1	3,7	0,86	70,75	1 102 210,53	3 06,17	638,93
Cargador	3	3,7	0,86	0,75	34 848,84	9,68	20,20
Descarga	3	3,7	0,86	0,75	34 848,84	9,68	20,20
TOTAL					16 667 642,5	4629,90	9661,94

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Energía suministrada por la leña y costo de la leña utilizada en el secado de un lote de café en pergamino**

Descripción	Valor	Unidad
Cantidad leña	31,84	Tarea
Densidad leña	577	$\frac{kg}{m^3}$
Poder calorífico	18 945,15	$\frac{kJ}{kg}$
Energía	487 275 978	kJ
Costo	3 184	Q,

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12 **Resumen de resultados de la T-Student para la Caracterización de la humedad del grano después del periodo de secamiento**

No, Muestra	Guardiola					
	1	2	3	4	5	6
1	12,5	12,7	11,8	12,1	11,5	12,4
2	12,4	12,4	12,4	11,6	12,6	12,6
3	12,1	11,8	12,6	12,1	12,6	11,7
4	12,3	12,4	11,7	12,3	12,1	12,1
5	11,7	12,4	12,4	12,1	12,4	12,2
6	12,3	11,7	12,6	11,7	12,1	12,8
7	12,4	11,4	12,1	11,5	12,1	12,4
8	11,9	12,1	11,9	12,1	12,4	11,9
9	12,1	12,1	12,2	12,4	11,7	11,4
10	11,7	12,3	12,1	12,4	11,8	12,1
Media aritmética	12,14	12,13	12,18	12,03	12,13	12,16
Desviación estándar	0,291	0,395	0,319	0,323	0,377	0,420
T-Student	1,520	1,042	1,784	0,293	1,090	1,206

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Resumen del análisis de varianza**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Tratamientos	5	0,135	0,027	0,211
Error	54	6,887	0,0127	
Total	59	–	–	

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Valores críticos de la distribución T-Student

v	α						
	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025
1	0.325	0.727	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706
2	0.289	0.617	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303
3	0.277	0.584	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182
4	0.271	0.569	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776
5	0.267	0.559	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571
6	0.265	0.553	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447
7	0.263	0.549	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365
8	0.262	0.546	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306
9	0.261	0.543	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262
10	0.260	0.542	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228
11	0.260	0.540	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201
12	0.259	0.539	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179
13	0.259	0.538	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160
14	0.258	0.537	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145
15	0.258	0.536	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131
16	0.258	0.535	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120
17	0.257	0.534	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110
18	0.257	0.534	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101
19	0.257	0.533	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093
20	0.257	0.533	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086
21	0.257	0.532	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080
22	0.256	0.532	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074
23	0.256	0.532	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069
24	0.256	0.531	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064
25	0.256	0.531	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060
26	0.256	0.531	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056
27	0.256	0.531	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052
28	0.256	0.530	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048
29	0.256	0.530	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045
30	0.256	0.530	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042
40	0.255	0.529	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021
60	0.254	0.527	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000
120	0.254	0.526	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980
∞	0.253	0.524	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960

Fuente: WALPOLE, Ronald, MYERS Raymond, MYRES, Sharon, YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p 753.

Anexo 2. Valores críticos de la distribución F

v_2	$f_{0.05}(v_1, v_2)$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

Fuente: WALPOLE, Ronald; MYERS Raymond; MYRES, Sharon; YE, Keying. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p 757.

Anexo 3. Propiedades del agua saturada

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _{fg} , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.98	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.95	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Fuente: YUNUS, Cengel. *Transferencia de calor y masa*. p 854.

Anexo 4. **Calor específico del grano de café pergamino**

Base	Modelo	Unidad	Rango de humedad
Húmeda	$0,95657 + 9,6425 X_{bh}$	kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹	11 % - 45 %
Seca	$1,3536 + 5,7859 X_{bs}$		12,36 % - 81,82 %

Fuente: MONTOYA, Esther Cecilia; OLIVEROS, Carlos Eugenio; ROA, Gonzalo. *Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino*. p. 30.

Anexo 5. **Condiciones de altura y presión del municipio de Acatenango**

Variable	Valor	Unidad
Altura	1 571	M
Presión	83 821,8	Pa

Fuente: Insivumeh.

Anexo 6. **Características de los motores eléctricos**

Equipo de Ubicación	Cantidad	Potencia de entrega (kW)	Eficiencia
Guardiola	6	3,7	0,88
Ventilador	6	5,5	0,91
Caldera	1	3,7	0,855
Cargadores	3	3,7	0,86
Banda descarga	3	3,7	0,86

Fuente: sistema de secado mecánico, Cooperativa Acatenango R.L