



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

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR
DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO
GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO**

Yonatan David Pérez Zamora

Asesorado por el Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR
DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO
GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

YONATAN DAVID PÉREZ ZAMORA

ASESORADO POR EL ING. FEDERICO GUILLERMO SALAZAR RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

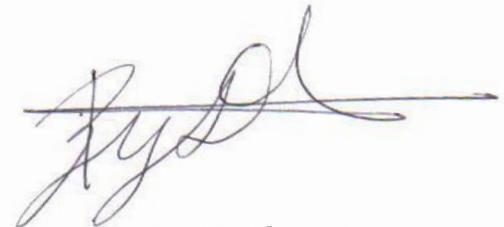
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León Paz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR
DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO
GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 noviembre de 2012.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yonatan David Pérez Zamora', written over a horizontal line.

Yonatan David Pérez Zamora

Guatemala, 10 junio de 2,013

Ing. Víctor Monzón
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Respetable Señor Director:

Por este medio hago constar que he tenido a la vista el informe final del trabajo de graduación del estudiante Yonatan David Pérez Zamora con carné 200715271, titulado: **"DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO"**.

Habiendo revisado dicho documento doy mi aprobación para que sea presentado para su autorización.

Atentamente,



Ing. Qco. Federico G. Salazar. R

Colegiado No. 201





Guatemala, 15 de julio de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.041.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-091-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Yonatan David Pérez Zamora.**

Identificado con número de carné: **2007-15271.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

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:

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Federico Guillermo Salazar Rodríguez.**

Habiendo encontrado el referido informe final del 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”


Ing. Otto Raúl de León de Paz
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Guatemala, 15 de julio de 2013
Ref. EI.Q.TG.202.2013

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente,

Estimados Señores

Como consta en el Acta TG-091-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Yonatan David Pérez Zamora.**

Identificado con número de carné: **2007-15271.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

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:

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINÓ

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Federico Guillermo Salazar Rodríguez.**

Habiendo encontrado el referido informe final del 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"



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Periodo 2009 - 2015



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **YONATAN DAVID PÉREZ ZAMORA** titulado: "**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR DE TÚNEL ROTARIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, agosto 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 559 .2013

El Decano 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: **DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EFICIENCIA DE UN SECADOR DE TÚNEL ROTATORIO EN PROCESO DISCONTINUO UTILIZANDO GRANO DE CAFÉ TIPO ARÁBIGO EN PERGAMINO**, presentado por el estudiante universitario **Yonatan David Pérez Zamora**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 12 de agosto de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme dado la oportunidad de llegar a alcanzar una de mis metas trazadas aunque no lo merezca.
Mi padre	Jorge Alirio Pérez Arenales por ser una influencia grande en mi vida y por su incondicional apoyo.
Mi madre	Lesbia Marina Zamora Gómez por haber sido el ángel que Dios puso en mi vida para que cuidara de mí.
Mi hermano mayor	Jorge Alirio Pérez Zamora por su fiel ayuda y por influenciar en mi vida de manera positiva.
Mi hermano menor	Werner Isaac Pérez Zamora por ser paciente conmigo y estar en todo momento pendiente de mí.
Mi iglesia	Fraternidad Evangélica Bethesda por sus incansables oraciones y formación espiritual.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Porque ha sido fiel, por darme la oportunidad de ser su hijo y su salvación, “hasta aquí me ayudó Jehová”.
- .
- Mis padres** Por su incomparable amor.
- Mi asesor** Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez, por su apoyo y orientación para llevar a cabo este proyecto.
- Mis amigos** Carlos Daniel Gómez Chicas, Carlos Eduardo Cermeño López, David Augusto de los Santos Chonay, por compartir sus conocimientos conmigo y por su amistad incondicional.
- Mis familiares** Porque de alguna u otra forma se preocuparon por mí, que Dios les bendiga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. El cultivo	1
1.2. La cosecha	1
1.3. El beneficio	2
1.4. El secado	4
1.5. Secado al sol	5
1.6. Secamiento mecánico.....	5
1.7. Etapas del secamiento del grano.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Operación unitaria de secado	9
2.2. Descripción general del proceso de secado	10
2.3. Condiciones internas	11
2.4. Mecanismo de secado	12
2.4.1. Evaporación	12
2.4.2. Vaporización	12
2.5. Velocidad de secado	13
2.5.1. Velocidad constante de secado	13

2.5.2.	Velocidad decreciente de secado	13
2.6.	Secado de granos	14
2.7.	Importancia de un buen secado	14
2.8.	Secado discontinuo	15
2.9.	Secadora de guardiola de túnel rotatorio.....	15
2.10.	Fuente de energía para calentar el aire.....	21
2.11.	El horno	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio	26
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	26
3.4.	Recursos materiales disponibles	27
3.4.1.	Equipo	27
3.4.2.	Cristalería	27
3.4.3.	Materia prima.....	28
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	28
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	31
3.6.1.	Porcentaje de humedad del grano.....	31
3.6.2.	Temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco	31
3.6.3.	Masa del volumen de la muestra	31
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	32
3.8.	Análisis estadístico	34
4.	RESULTADOS.....	35
4.1.	Curvas de secado.....	35
4.2.	Tiempo de secado	41
4.3.	Consumo de energía para secar un lote	41
4.4.	Eficiencia térmica del secador	42

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	43
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49
APÉNDICE.....	51
ANEXOS	72

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Elevación y vista transversal parcial del equipo de secado.....	17
2.	Vista lateral de la unidad motriz.....	18
3.	Vista de la sección transversal.....	19
4.	Vista frontal de las aspas.....	20
5.	Vista lateral de las aspas	20
6.	Diagrama de procedimiento	28
7.	Masa del sólido en función del tiempo.....	35
8.	Humedad del grano en función del tiempo.....	36
9.	Fracción en base seca en función del tiempo.....	37
10.	Humedad libre en función del tiempo.....	38
11.	Velocidad de secado en función del tiempo.....	39
12.	Velocidad de secado en función de la humedad libre.....	40

TABLAS

I.	Composición química en base húmeda	21
II.	Análisis aproximado de la leña, en porcentaje, base seca.....	22
III.	Poder calorífico de la leña seca	22
IV.	Poder calorífico de la leña de pino en función del contenido de humedad.....	23
V.	Variables.....	25
VI.	Datos originales.....	32
VII.	Comparación de tiempos de secado.....	41
VIII.	Energía consumida.....	41
IX.	Eficiencia térmica del equipo.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Calor
ρ	Densidad
η	Eficiencia
h	Entalpia
\dot{m}	Flujo másico
Xbh	Fracción del sólido en base húmeda
Xbs	Fracción del sólido en base seca
°C	Grados celsius
X*	Humedad de equilibrio
X	Humedad libre
Hr	Humedad relativa
Kg	Kilogramo
m_f	Masa final
m₀	Masa inicial
P*	Presión de saturación
T	Temperatura
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo
Tbs	Temperatura de bulbo seco
Tr	Temperatura de rocío
t	Tiempo
R	Velocidad de secado
Vv	Velocidad del viento
V	Volumen específico

GLOSARIO

Calor específico	Energía necesaria para aumentar 1°C la temperatura de un aire húmedo por kg de aire seco.
Calor húmedo	Capacidad calorífica de 1kg de aire seco y la humedad que contiene.
Carta psicométrica	Diagrama que representa el sistema aire – vapor de agua correspondiente a diferentes temperaturas.
Contenido de humedad en base húmeda	Kilogramos de agua contenidos en kilogramos de sólido húmedo.
Contenido de humedad en base seca	Kilogramos de agua contenido en kilogramos de sólido seco.
Eficiencia evaporativa	Relación entre la capacidad de evaporación real con la capacidad que se obtendría en un caso ideal.
Eficiencia térmica	Relación entre el calor usado en la evaporación y el calor suministrado.

Entalpia	Cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede cambiar con su entorno.
Humedad	Cantidad de vapor de agua presente en el aire.
Humedad en el equilibrio	Contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.
Humedad libre	Humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio.
Humedad ligada	Humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.
Humedad no ligada	Humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.
Presión de vapor	Presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo.

Punto de rocío	Temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura.
Secado por lotes	Proceso semicontinuo que mientras se lleva a cabo no entra ni sale masa, pero existe un flujo de aire continuo.
Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura de equilibrio termodinámico entre la velocidad de transferencia de calor por convección y velocidad de transferencia de materia que abandona la superficie.
Temperatura de bulbo seco	Temperatura del aire que no considera los factores ambientales, que es medida con un termómetro convencional.
Volumen húmedo	Es el volumen en metros cúbicos de un kilogramo de aire seco y el vapor de agua que contiene.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en determinar un tiempo teórico de retención del grano de café tipo arábigo en pergamino, dentro de un secador de túnel rotatorio que es aplicable para secadores análogos. Para determinar dicho tiempo de retención se obtuvieron curvas de secamiento a partir de datos experimentales, para implementarlo en el equipo y así determinar que el equipo está en óptimas condiciones y mantener la eficiencia del equipo.

El proceso de secamiento de café pergamino para este equipo de túnel rotatorio en estado estacionario, se calentó el horno con leña para calentar el aire, se llenó un sifón con una banda de paletas transportadoras accionadas por un motor que asciende a 35 m de altura a una plataforma, que por medio de gravedad hizo que los granos descendieran hacia una tolva que fue llenada con 120 quintales de café con un porcentaje de humedad de 20 % luego se llenó el cilindro rotatorio.

Se tomó una muestra del grano de café a cada hora para determinar sus propiedades físicas, se graficaron las curvas de secado que son las principales precursoras para determinar un tiempo teórico. Los resultados se basaron en las propiedades físicas del producto que requieren que el café tenga una humedad del 12 % para su comercialización. Se comparó el tiempo obtenido de las curvas de secado con el tiempo empírico, no hubo diferencia siendo ambos iguales lo que indica que se está llevando el proceso adecuadamente, la eficiencia térmica del secador es del 45 %.

OBJETIVOS

General

Determinar experimentalmente la eficiencia de un secador de túnel rotatorio en proceso discontinuo utilizando grano de café tipo arábigo (*Coffea Arábica*) en pergamino.

Específicos

1. Elaborar curvas de secado para el grano de café arábigo en pergamino.
2. Determinar experimentalmente el tiempo óptimo de retención del grano dentro del túnel rotatorio para un proceso discontinuo.
3. Comparar el tiempo empírico con el tiempo de retención experimental para evaluar funcionamiento óptimo del equipo.
4. Calcular el consumo de energía para todo el proceso.
5. Determinar la eficiencia térmica del secador.

HIPÓTESIS

Hipótesis de la investigación

Es posible determinar la eficiencia de un secador, a partir de un tiempo de retención del grano de café en pergamino dentro del equipo de secado por medio de curvas de secamiento obtenidas a partir de datos experimentales.

Hipótesis Estadística

Hipótesis aula, H_0

No es necesario conocer el tiempo experimental óptimo de retención del grano dentro del equipo para determinar la eficiencia del mismo.

Hipótesis alternativa, H_a

Es posible determinar el tiempo óptimo de retención para el equipo y tener un porcentaje de humedad del grano parecido al que se obtiene utilizando el tiempo empírico.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, en algunos beneficios de café, se desconoce la eficiencia de los equipos de trabajo, como el caso de la secadora de café, que es el equipo que tiene como objetivo reducir la humedad del café, hasta una admitida por la industria cafetalera. La calidad del café, tiene que ver con las labores de manejo en todas las etapas desde la recolección del grano hasta su envasado.

El proceso de secado de café es una etapa crítica, de él depende enormemente la calidad y el mercado de este delicioso producto. Para esto es de suma importancia, saber el tiempo de retención de secamiento apropiado para un proceso discontinuo en un secador de túnel rotatorio. Es necesario tomar en cuenta el comportamiento de las curvas de secamiento de este grano. Para evaluar el comportamiento de cada una de las curvas de secado, se cuenta con una secadora de túnel rotatorio, ubicada en la aldea San Antonio El Teocinte, del municipio de Santa Cruz El Naranjo, Santa Rosa.

Entre los principales parámetros que deben tomarse en cuenta en el proceso de secado son la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire de secado. Realizando una comparación entre el tiempo de retención óptimo y el tiempo empírico, para determinar así si el equipo está siendo operado correctamente. El producto será evaluado, mediante su porcentaje de humedad alcanzado para ambos tiempos. Los resultados tendrán que estar dentro de los parámetros establecidos, para continuar con la evaluación e interpretación de dichos resultados.

1. ANTECEDENTES

Guatemala es un país netamente exportador de café, el territorio guatemalteco es muy propicio para cultivar café de calidad, ya que los mejores cafés del mundo son cosechados en las alturas de los montes, las regiones montañosas de Huehuetenango, Acatenango, San Marcos y así como estos se pueden mencionar muchos otros lugares donde el café es de calidad. Por eso el café de Guatemala es muy valorado en muchos países del mundo.

1.1. El cultivo

El café de Guatemala se siembra en planicies y quebradas, a diferentes alturas. El mejor café crece en suelo de origen volcánico, entre los 1 000 y 1 500 metros sobre el nivel del mar. Las más conocidas regiones para el cultivo del café de Guatemala son, la boca costa sureste y occidental del Pacífico así como la región de Alta Verapaz y las montañas de Huehuetenango, en donde las condiciones climáticas son excelentes para obtener un buen grano. El beneficio se encuentra en la región de Santa Rosa a una altitud de 1 205 metros sobre el nivel del mar con una temperatura promedio de 22°C y presión 87 662,089 Pa.

1.2. La cosecha

La recolección, es la etapa más costosa de la producción de café, se inicia cuando la cáscara del fruto, ha tomado color cereza. La tarea es delicada por cuanto se requiere de mucho cuidado para no dañar las hojas, los botones o cortar la fruta inmadura.

Pues existen diferencias significativas en la calidad de la bebida, que puede resultar alterada si el café se beneficia cuando está verde, completamente maduro o sobre maduro. El grano verde tiende a producir en la taza, el sabor áspero, el grano sobre madurado en el árbol se encoje y se seca y produce un sabor agrio o frutoso. La cosecha de café, consiste en recolectar selectivamente solo las cerezas maduras, evitando el quiebre de las ramas y la destrucción de las yemas florales y las hojas.

La cosecha de café debe realizarse en estado de cereza madura. El café cereza cosechado es colocado en sacos de yute limpios y transportados a la planta de beneficio, donde se encuentran los equipos necesarios para el procesamiento. El lugar donde se acopia el café, tiene que estar limpio y libre de contaminación.

1.3. El beneficio

El beneficiado de café consiste en una serie de procedimientos que ayudan a liberar el café de los cuatro envoltorios que lo protegen:

- Cáscara de cereza o pulpa
- El mucílago que envuelve los dos granos
- El pergamino
- La fina película que protege el grano oro

La existencia de grandes plantaciones y la abundancia de agua por las lluvias torrenciales en algunas regiones de Guatemala favorecen el método del beneficiado del café húmedo.

El método de beneficiado seco se deja secar el grano al sol con la cáscara y la pulpa, lo que depende en mucho de un tiempo seco y cálido prolongado, condición que no siempre se cumple, ésta es la diferencia entre los cafés lavados y los no lavados, que dan una calidad inferior. Un beneficio de café húmedo consiste en pulperos, grandes tanques o pilas de fermentación, lavaderos y amplios patios de concreto, o sea que técnicamente en tres días puede procesarse la cosecha, el despulpado, la fermentación, el lavado y el secado, que son las diferentes fases del beneficio húmedo.

El café recolectado debe despulsarse el mismo día para evitar los efectos de recalentamiento y sobre fermentación, en el método primitivo el café cereza se vertía primero en agua para podrir la cáscara y luego exprimir lo más fácilmente con los pies o mazos en toneles o cribas, o piedras de moler, después se pasaba por agua para separar la cáscara del grano, la pulpa se utiliza para agregar materia orgánica al suelo de los cafetales.

Después del despulpado, el café reposa en tanques de agua o pilas para que se fermente, allí permanece 24 a 36 horas en climas cálidos y de 36 a 48 horas en climas fríos, para que el mucílago, “miel” o materia viscosa se desprenda del grano, una fermentación uniforme conserva la calidad del café “suave”. Luego se lava para remover el mucílago y limpiarlo de cualquier materia, en forma manual o mecánica, en algunas fincas se pateaba el café en una pila, otras usan lavadoras mecánicas, también se pueden utilizar bombas centrífugas especiales, después se pasa por el correteo continuo, éste es un canal de 45 a 60 cm que sirve para clasificar el café, el cual conforme a su peso se va depositando en la superficie inferior, en tanto que la pulpa y otros residuos de la fermentación flotan y son desechados.

1.4. El secado

El secado es la etapa de beneficio que tiene el propósito de disminuir la humedad del grano hasta llegar al 10 - 12 por ciento, porcentaje con el que se puede almacenar el café sin sufrir ataques de hongos o adquirir olor y sabor indeseables. En el secado del café pergamino se deben extremar las precauciones, debido a que el grano es altamente higroscópico y sensible para absorber los olores del medio que lo rodea, lo que se manifiesta en la calidad de la bebida. El secado natural o al sol se realiza en tendales o patios de cemento; y/o, en las marquesinas.

El secado al sol permite lograr una mejor calidad si los granos no se rehumedecen; por eso, es conveniente cubrir inmediatamente el café con lonas, en caso de lluvias. La forma tradicional es extenderlo de 6 a 15 días en grandes patios de calicanto, donde los peones lo mueven constantemente con un rastrillo para que el sol lo seque por todos lados. Se ideó una forma para proteger el café del sereno de la noche, construyendo una especie de techo de paja.

Cuando la producción es grande y las nubes o las lluvias no permiten el secado es necesario el uso de secadoras mecánicas que economizan jornales y tiempo ya que este proceso se puede hacer en 24 a 72 horas, también se ahorra un 20 a 15 % de tiempo en el secado si se coloca en un centrífuga que extrae hasta un 15 % de agua y toda materia viscosa pegada al pergamino, posteriormente se pasa el café por el aventador para limpiarlo de todo polvo y basura.

Cuando no se tiene la centrifugadora lo que se hace es escurrir el café en patios grandes para escurrir lo más que se pueda de agua al café. Cuando el café ha sido beneficiado y liberado de los 4 envoltorios que lo cubren, siguen dos procesos muy importantes, que garantizan la calidad y el precio en el mercado, se trata de la clasificación por el tamaño y la forma, que se puede hacer mecánica o manualmente. La selección de los granos se efectúa sobre una banda que corre a una velocidad regulada ante la cual mujeres remueven los granos defectuosos, negros manchados o quebrados.

1.5. Secado al sol

El secamiento al sol, es la práctica más común en lugares donde puede aprovecharse la energía solar y la energía del aire, además, los costos de inversión en equipos y los costos de operación son razonablemente más bajos.

1.6. Secamiento mecánico

En las zonas donde no es posible aprovechar la energía del sol y del aire, es preferible combinar el escurrimiento del grano y el presecamiento al sol con un sistema mecánico de secado, que consiste en:

- Una fuente de calor (horno)
- Un ventilador para forzar aire caliente a través del grano
- Una estructura en compartimientos donde se coloca la carga del café

El elemento básico en el secamiento es el aire caliente, que es mecánicamente impulsado y forzado a través de la masa de café. Para que el aire adquiera la condición desecante, es necesario aumentar su temperatura y así, bajar la humedad relativa del mismo. La condición del aire del ambiente juega un papel importante durante el proceso de secamiento; bajo condiciones lluviosas o por la noche la humedad relativa alcanza valores de saturación (100 %), mientras que en ambientes cálidos y soleados desciende a 60, 50 % o menos. Por esta razón, es recomendable evitar secar mecánicamente por la noche, ya que las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente son severas.

El ventilador es uno de los elementos que más influye en el diseño y funcionamiento del secamiento mecánico, su función es hacer pasar a través de todo el sistema, un caudal de aire determinado, venciendo las resistencias opuestas de los componentes (ductos, masa de café, etc.). El flujo de aire es el volumen de aire caliente y seco que impulsa el ventilador al área de café a secar, calentando el grano y arrastrando simultáneamente la humedad a través del proceso de evaporación. Es recomendable utilizar altos volúmenes de aire en vez de elevadas temperaturas de secamiento.

Para que el café sea de la mejor calidad este tiene que ser cosechado a una altura determinada, esto implica que exista un porcentaje de humedad relativa en el ambiente, este afecta el proceso de secado, por esta razón se hace uso de equipos de secado para llevar a cabo esta tarea, la humedad relativa del ambiente es un factor a tomar en cuenta en el momento de diseñar el equipo de secado.

1.7. Etapas del secamiento del grano

El secamiento del grano tiene tres etapas importantes durante el proceso, que van acompañadas de diferentes temperaturas a aplicar, estas etapas se definen como:

- Estabilización 10 – 20 % humedad 60 °C (aplicados)
- Fase crítica 20 – 40 % humedad 70 °C (aplicados)
- Evaporación constante 40 – 55 % humedad 50 °C (aplicados)

La fase de evaporación constante coincide con el pre secado mecánico, donde se necesitan altos volúmenes de aire, la evaporación del agua del grano es fácil y rápida, hasta un 40 % de humedad. Dicha fase es posible efectuarla con pre secadoras o en patios de secamiento donde se justifica su aplicación.

La fase crítica principia, cuando el grano traslada su humedad desde su interior hasta su superficie; esta fase del pergamino está asociada con la resistencia de la difusión del agua. Se inicia la disminución del tamaño del grano al ir perdiendo la humedad. En esta fase se pueden utilizar secadoras de tipo rotativo y estático. La estabilización de humedad del grano es el período final de secamiento, en donde el grano alcanza su punto de secado, se recomienda realizarla al sol, o en secadoras mecánicas a temperaturas no mayores de 60 grados centígrados.

2. MARCO TEÓRICO

La operación de secado es la parte fundamental en que el café adquiere su calidad, el secado es muy importante llevarlo a cabo de la mejor manera, porque esto permite que el café pueda ser almacenado sin que pierda su valiosa calidad, que es muy exigida en el mercado de valores. El proceso de secado es una operación que consiste en manipular las propiedades físicas del café lavado, para que este pueda ser llamado pergamino.

2.1. Operación unitaria de secado

Los procesos químicos en general y cada operación unitaria en particular tienen como objetivo modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia, habrá una forma más útil a nuestros fines, para este cambio puede hacerse por tres caminos:

- Modificando su masa o composición (separación de fases, mezcla, reacción química, etc.).
- Modificando el nivel o calidad de la energía que posee (enfriamiento, vaporización, aumento de presión, etc.).
- Modificando sus condiciones de movimiento (aumentando o disminuyendo su velocidad).

El secado es una operación unitaria física de transferencia simultánea de calor y materia por contacto directo entre fases que consiste en hacer una separación parcial de pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido del líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. Cuando se habla de separación parcial se hace referencia a la eliminación de un porcentaje de humedad en una sustancia, esto quiere decir que el sólido o producto no queda completamente seco. En general el secado es la remoción de cantidades relativamente pequeñas de agua.

2.2. Descripción general del proceso de secado

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido es decir; en la microestructura del mismo. Cuando un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos procesos ocurrirán simultáneamente:

- Habrá transferencia de energía (comúnmente como calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie, (proceso 1).
- Habrá transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido, (proceso 2).

La velocidad a la cual el secado es realizado está determinada por la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se llevan a cabo. La transferencia de energía, en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos.

Este caso se refiere al proceso 1, donde, la eliminación de agua en forma de vapor de la superficie del material, depende de las condiciones externas tales como:

- Temperatura
- Humedad
- Flujo del aire
- Área de la superficie expuesta
- Presión.

Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado cuando la humedad de la superficie está siendo removida. En algunos materiales puede haber encogimiento, excesiva evaporación en la superficie, después que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos gradientes de humedad del interior a la superficie. Este fenómeno es causado por el sobre secado y encogimiento y consecuentemente las altas tensiones dentro del material, dando como resultado agrietamiento y deformación.

2.3. Condiciones internas

El movimiento de humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física dentro del sólido, la temperatura y su contenido de humedad. En una operación de secado cualquiera de estos procesos puede ser el factor que determine la velocidad de secado. A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del sólido mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie.

2.4. Mecanismo de secado

El mecanismo de secado es la forma en que el agua líquida contenida en el grano, es extraída en forma de vapor por medio del aire caliente, este mecanismo en general es el mismo para cualquier grano que se quiera secar. 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.

2.4.1. Evaporación

Esta ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre, la temperatura puede ser disminuida, bajando la presión (evaporación al vacío). Si la presión disminuye baja más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelada.

2.4.2. Vaporización

El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

2.5. Velocidad de secado

La velocidad de secado se refiere a la cantidad de kilogramos de agua líquida extraída en forma de vapor en función del tiempo en un área determinada, existen diferentes tipos de velocidad de secado para los cuales se aplica el mismo criterio, con la diferencia que se trabajan a diferentes condiciones.

2.5.1. Velocidad constante de secado

La superficie contiene humedad, la vaporización se lleva a cabo a partir de ahí. En esta etapa de secado la difusión del vapor del agua se da a través de la interface aire/humedad y la velocidad a la cual la superficie por difusión es eliminada. Hacia el final del período constante, la humedad tuvo que ser transportada del interior del sólido hacia la superficie por fuerzas capilares. Cuando el promedio del contenido de humedad ha alcanzado el contenido de humedad crítico, la película de humedad en la superficie ha sido tan reducida por evaporación que más allá del secado causa distorsiones más allá de la superficie, entonces, el proceso se controla por las resistencias exteriores.

2.5.2. Velocidad decreciente de secado

La velocidad a la cual la humedad puede pasar a través del sólido como resultado de la concentración de gradientes entre las partes más profundas y la superficie es el paso a controlar. Dado que, la profundidad media del nivel de humedad incrementa progresivamente y la conductividad de calor de las zonas externas secas es muy pequeña, la velocidad de secado es cada vez más influenciada por la conducción de calor.

Sin embargo, si el producto seco tiene una densidad alta y cavidad pequeña con poros pequeños, el secado es determinado no tanto por la conducción de calor pero, sí por una resistencia alta a la difusión dentro del producto. Como la concentración de humedad disminuye por el secado, la velocidad de movimiento de humedad interna también disminuye.

2.6. Secado de granos

El secado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el grano corre el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado se realiza para inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioración. Lo que el secado puede ser un método universal de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla.

2.7. Importancia de un buen secado

Un secado inadecuado afecta al contenido y composición de los principios activos y el almacenamiento inadecuado conduce a la pérdida de los componentes del café, reduce la calidad comercial del producto antes del almacenamiento mismo o acelera el proceso de deterioro del café.

2.8. Secado discontinuo

Un proceso discontinuo es aquel que mientras se lleva a cabo el proceso no entra ni sale masa, según el balance de masa no hay flujo y según el balance de masa lo que se genera es igual a lo que se acumula.

2.9. Secadora de guardiola de túnel rotatorio

Estos secadores directos son básicamente adaptaciones del secador para la operación continua. Consisten en túneles relativamente largos que a través de los cuales se mueve internamente el grano por medio de paletas llenas del sólido que se va a secar, en contacto con una corriente de gas para evaporar la humedad. Las paletas pueden empujarse continuamente a través del secador mediante una cadena móvil que su función es llenar una tolva que se mantiene llena, a la cual se encuentran unidos. En un arreglo simple, los platos cargados se introducen periódicamente por la parte superior del secador.

El tiempo de residencia en el secador debe ser lo suficientemente grande como para reducir al valor deseado del contenido de humedad del sólido. Para operaciones a temperaturas relativamente bajas, generalmente se calienta el gas mediante aire calentado con vapor; ahora bien, para temperaturas más elevadas y especialmente para productos que no necesitan mantenerse escrupulosamente limpios, se puede utilizar el gas de combustión producido por la combustión de un combustible. Puede utilizarse el flujo en paralelo o a contracorriente del gas y del sólido; en algunos casos, ventiladores dispuestos a lo largo de los lados del túnel que soplan el gas a través de la tubería en flujo tangencial.

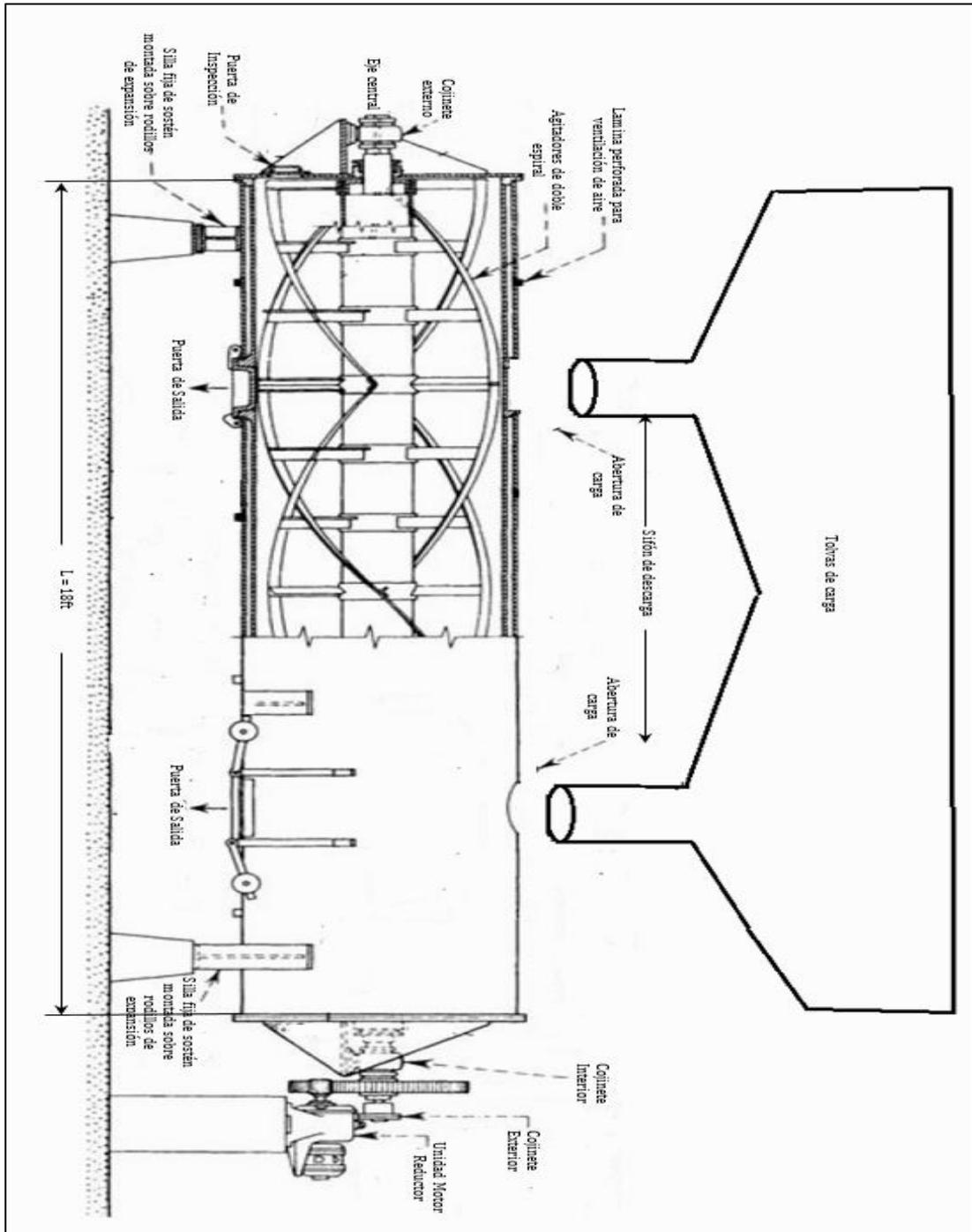
La operación puede ser básicamente adiabática o el gas puede calentarse con espirales de calentamiento a lo largo de su trayectoria a través del secador; en este caso, la operación puede ser básicamente a temperatura constante. Parte del gas puede reciclarse, como en el caso de los secadores por lotes, para economizar calor. Es posible utilizar los secadores de tipo túnel para cualquier tipo de grano.

Para este secador se tiene una relación $L/D = 3$ con las siguientes dimensiones $L = 18$ ft y $D = 6$ ft, se trabaja con una velocidad de 3 RPM y un porcentaje de llenado de 100 % para una carga de 120 quintales o más dependiendo de la capacidad del equipo, el porcentaje de llenado es el adecuado según expertos en la fabricación de estas secadoras, porque si se utiliza un porcentaje menor la carga tiende a desbalancear las chumaceras creando una avería en el equipo, conforme el grano va perdiendo humedad también pierde volumen y masa.

Esta secadora tipo guardiola es llamada así en honor al inventor español Josep Guardiola, quien fue propietario de la finca de café Chocolá en Guatemala en 1897 y tras su muerte dejó un legado, que es adaptado por los cafetaleros del presente. Esta secadora es preferida por los dueños de los beneficios por su amplia capacidad de carga, ya que puede darse desde cien quintales de café húmedo hasta 250 quintales, dando así un proceso a gran escala y su inigualable calidad de secado que es de beneficio para el propietario.

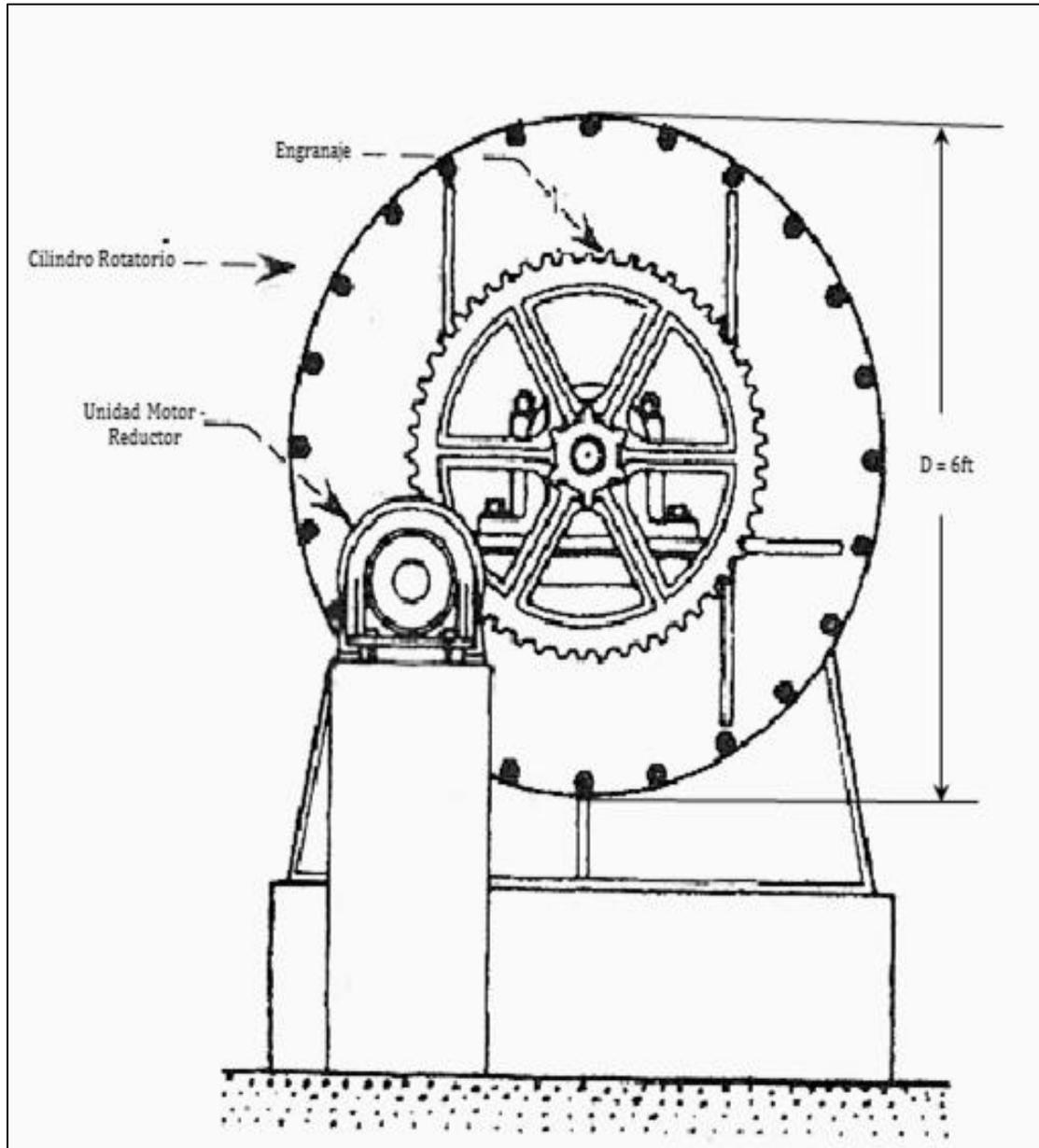
A continuación en la figura 1 se muestra un diagrama seccionado del secador de túnel rotario de guardiola.

Figura 1. Elevación y vista transversal parcial del equipo de secado



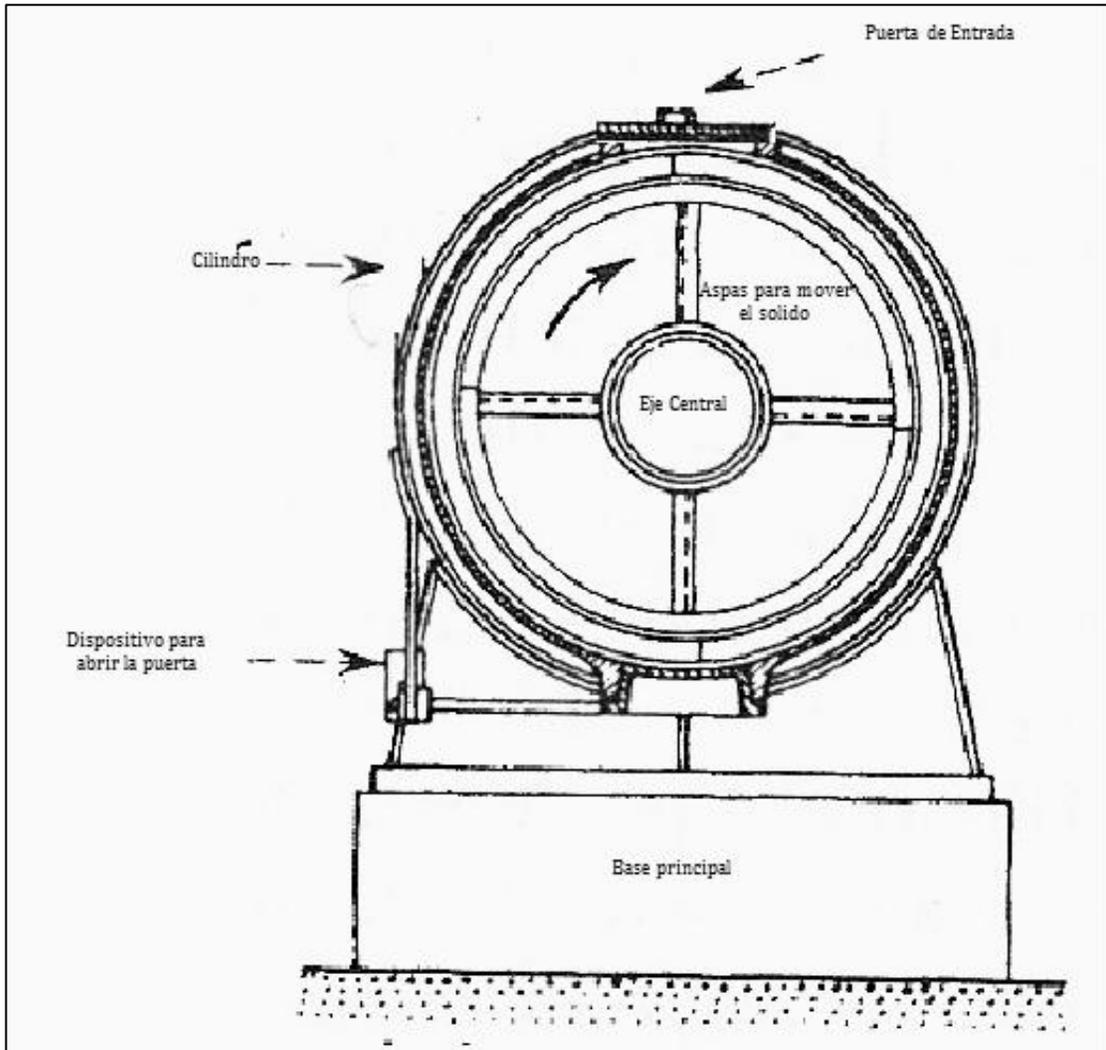
Fuente: Manual del Ingeniero Químico. p.84.

Figura 2. Vista lateral de la unidad motriz



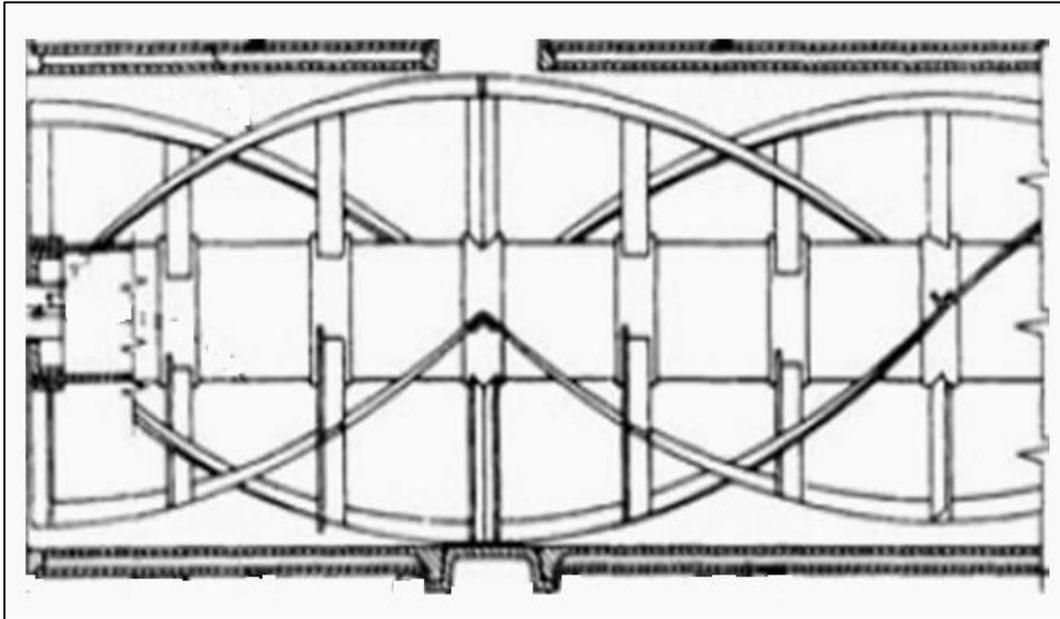
Fuente: Manual del Ingeniero Químico. p.84.

Figura 3. Vista de la sección transversal



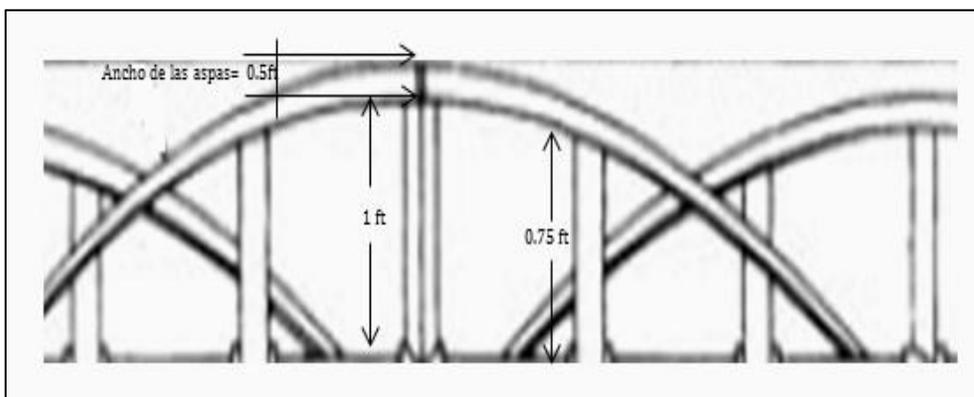
Fuente: Manual del Ingeniero Químico. p.84.

Figura 4. **Vista frontal de las aspas**



Fuente: Manual del Ingeniero Químico. p.84.

Figura 5. **Vista lateral de las aspas**



Fuente: Manual del Ingeniero Químico. p.84.

2.10. Fuente de energía para calentar el aire

Como fuente de energía se tiene un horno de combustible sólido, como combustible sólido se hace uso de leña, El contenido de humedad de la leña recién cortada varía entre el 40 y el 50 %; luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la leña baja aproximadamente al 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 en base húmeda**

Compuesto químico	Contenido de humedad en porcentaje de base húmeda		
	0	20	40
Carbono	50,30	40,24	30,18
Hidrógeno	6,20	4,96	3,72
Oxígeno	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	100,00	100,00	100,00

Fuente: < <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>>. [Consulta: mayo de 2013].

Se observa que el contenido de azufre de la leña es insignificante, lo que disminuye el riesgo de contaminación con este combustible. En la tabla II se presenta la composición aproximada de la leña. El elevado contenido de materias volátiles influye en la temperatura mínima exigida para la combustión completa.

Tabla II. **Análisis aproximado de la leña, en porcentaje, base seca**

Materiales Volátiles	80,01
Carbono Fino	19,53
Cenizas	0,52

Fuente: < <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>>. [Consulta: mayo de 2013].

Tabla III. **Poder calorífico de la leña seca**

Especie	Hi (kJ/kg)
Eucalipto	19 228
Pino	20 482
Cedro	18 066
Ciprés	21 443
Encino	19 500
Media	19 744

Fuente: < <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>>. [Consulta: mayo de 2013].

Tabla IV. **Poder calorífico de la leña de pino en función del contenido de humedad**

Contenido de humedad (%)	Hi (kJ/kg)
0	19 880
10	17 644
20	15 412
30	13 180
40	10 947
50	8 715
60	6 483

Fuente: < <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>>. [Consulta: mayo de 2013].

2.11. El horno

El horno es el lugar donde se quema el combustible, es decir, donde la energía química potencial del combustible se transforma en energía térmica. En el horno se quema el combustible en contacto con cierta cantidad recomendada de aire en exceso; puede haber una pequeña pérdida de energía al ambiente. La energía liberada se incorpora a los gases antes de salir del horno y todos los compuestos volátiles se deben quemar antes de salir de este.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Este diseño metodológico es una relación clara y concisa de cada una de las etapas de la investigación, muestra la descripción de como se realizó la investigación.

3.1. Variables

Se definió la variable como todo aquello que se va a medir, controlar y estudiar en la investigación. Se tomó en cuenta la capacidad de poder medir y controlarlas en el momento de llevarlas al proceso y tomarlas en cuenta.

Tabla V. Variables

Variable	Dependiente	Independiente	Respuesta
Temperatura de bulbo húmedo		X	
Temperatura de bulbo seco		X	
Flujo másico de aire caliente	X		
Velocidad de flujo de aire	X		
Porcentaje de humedad inicial		X	
Porcentaje de humedad final			X
Humedad relativa		X	
Humedad absoluta		X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El beneficio de café contiene muchos procesos en los cuales podemos encontrar el secado, que es una operación unitaria de mucha importancia para la comercialización, conservación, transporte del producto de café en pergamino, para el cual esta investigación se hizo únicamente para dicha operación unitaria, usando como parte fundamental del proceso el secador de túnel rotatorio que trabaja en un estado intermitente.

En las evaluaciones de cada corrida se buscó encontrar un tiempo óptimo experimental por medio de las curvas de secado para demostrar juntamente con el tiempo empírico adquirido con la experiencia que el equipo de secado funciona de manera óptima.

3.3. Recursos humanos disponibles

Se contó con la colaboración de 10 personas pertenecientes al beneficio para realizar el proceso de carga y descarga del grano en el equipo de secado, también entre los colaboradores se encuentran personas capacitadas para el manejo del horno y carga de leña, así como el asesor y el investigador.

- Investigador: Yonatan David Pérez Zamora
- Asesor: Ingeniero Químico Federico Salazar

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos son todos aquellos medios que se emplearon para llevar a cabo el estudio de campo.

3.4.1. Equipo

El equipo que se utilizó para el estudio de campo fue proporcionado por el beneficio.

- Planta de secado del beneficio de café húmedo
- Báscula
- Trilladora de café
- Camión de volteo

3.4.2. Cristalería

La cristalería es el recurso que el investigador proporcionó para hacer las mediciones correspondientes a la investigación.

- Termómetros
- Medidor de Humedad
- Computadora
- Instrumentos de escritorio
- Cronómetro
- Balanza

3.4.3. Materia prima

La materia prima para este caso es el café cortado o cereza que luego es lavado, para convertirse en café pergamino.

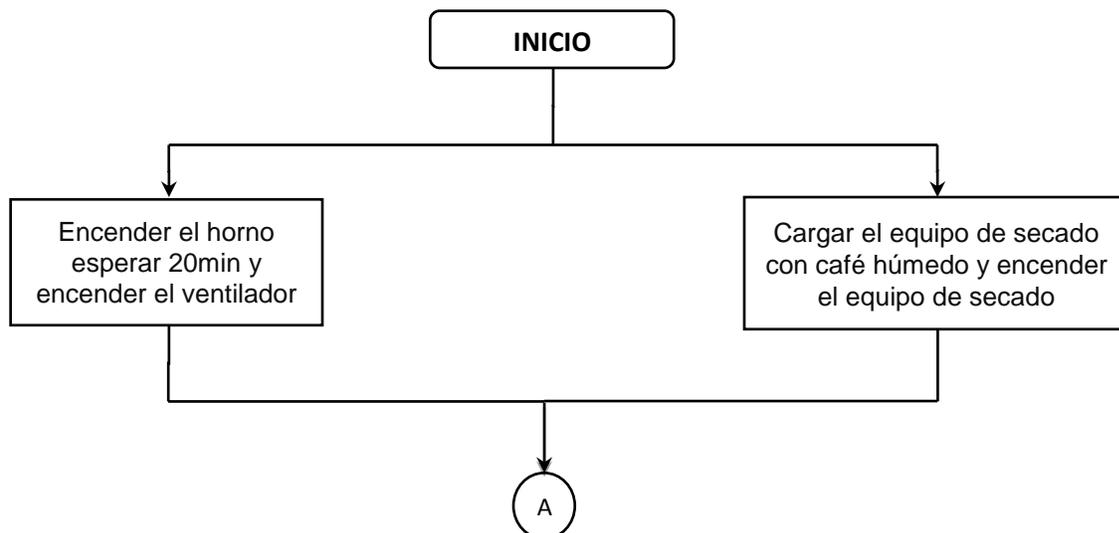
- Café húmedo

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

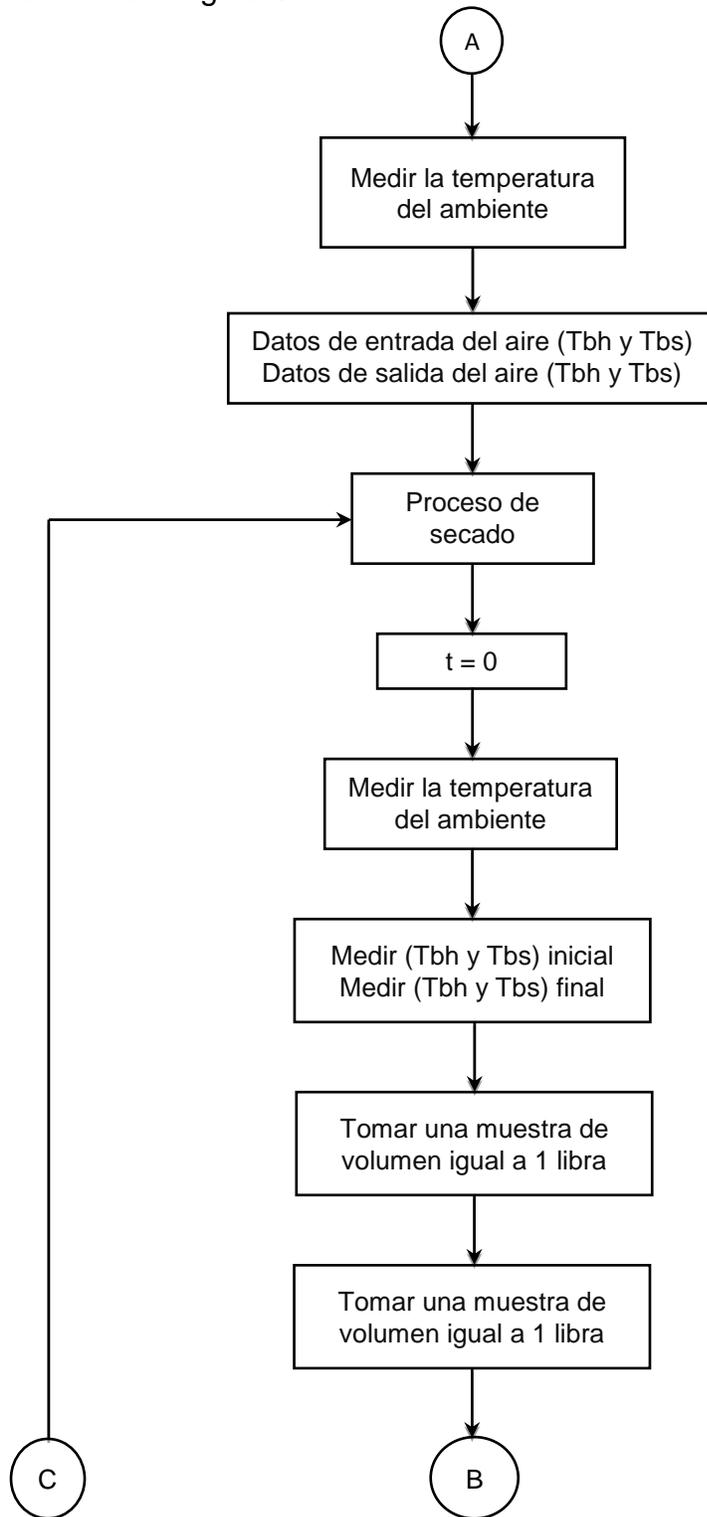
Para poder evaluar las características del secado se llevaron a cabo técnicas cuantitativas para realizar las curvas de secado y poder analizar los índices de calidad se tomaron datos del proceso de:

- Temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco
- Porcentaje de humedad del café
- Masa del volumen de 1 libra en función del tiempo

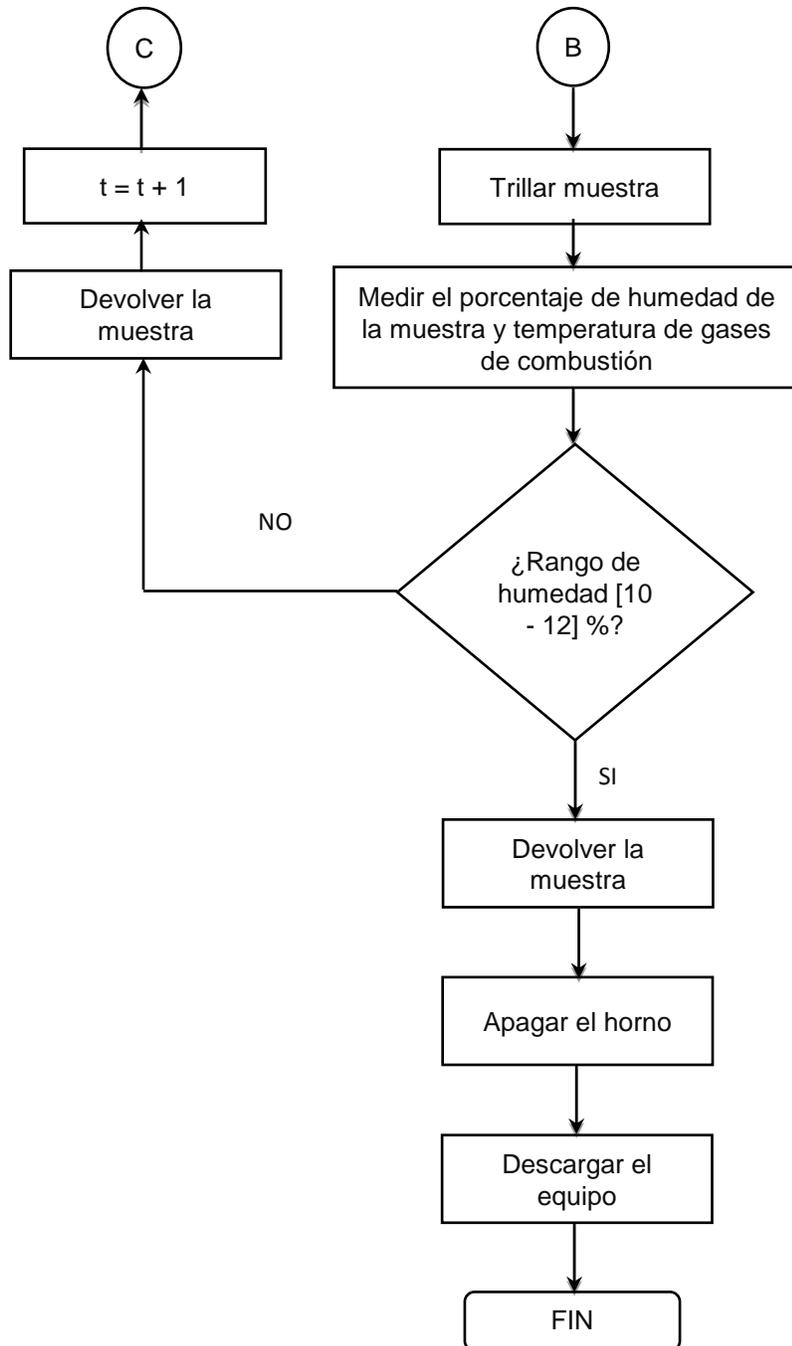
Figura 6. Diagrama de procedimiento



Continuación de la figura 6.



Continuación de la figura 6.



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para reunir la información necesaria para determinar las curvas de secado y las propiedades del aire que se procesaran para determinar la eficiencia térmica del equipo, se hizo uso de las variables de medición.

3.6.1. Porcentaje de humedad del grano

Para el análisis del porcentaje de humedad del grano de café se hizo uso de un medidor de humedad de granos de café, con un rango de porcentaje de 0 a 30 % de humedad, midiendo la humedad a cada hora hasta llegar a la humedad deseada. Se utiliza para el control y la medida exacta de humedad en el proceso de almacenamiento, distribución y procesos industriales que requieren controlar humedad en cereales. El porcentaje idóneo para la comercialización, transporte, almacenamiento, proceso de tostadura, etc., es de 10 – 12 %. Para esto es necesario hacer uso del medido de humedad de granos.

3.6.2. Temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco

A cada hora se midieron las temperaturas de bulbo húmedo y seco del aire que entra al equipo de secado y las temperaturas correspondientes a la salida del equipo. Esto con el fin de determinar la humedad relativa del aire.

3.6.3. Masa del volumen de la muestra

En el mismo tiempo que se tomaba la muestra para medir su humedad, se midió la masa de 1 libra de volumen de café en pergamino, esto para dar seguimiento a la reducción de masa mientras perdía agua.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos de temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco fueron tomados a cada hora con el fin de obtener datos puntuales en función del tiempo para poder graficarlos. Estas temperaturas muestran que es aire caliente el que ingresa al equipo de secado. Los datos de salida del aire del secador indican que salen con una temperatura menor y por consiguiente con un porcentaje de humedad más alto que cuando entró al equipo, mostrando que el aire caliente que entraba sale más frío.

Tabla VI. Datos originales

No.	Hora	Datos de Entrada		Datos de Salida		Datos del Grano		Ambiente
		Tbh (°C)	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Tbs (°C)	%h	m (oz)	T (°C)
0	06:30	21	47	17	19	18,7	16,0	17
1	07:30	31	61	17	19	18,5	15,8	18
2	08:30	31	61	20	21	18,5	15,8	20
3	09:30	31	61	21	23	18,4	15,8	21
4	10:30	21	51	25	26	18,4	15,8	21
5	11:30	31	81	26	28	18,1	15,5	28
6	12:30	32	61	26	28	18,1	15,5	28
7	13:30	31	60	26	28	18,1	15,5	28
8	14:30	32	65	25	27	17,7	15,3	28
9	15:30	30	70	25	27	17,7	15,3	28
10	16:30	30	71	25	27	17,7	15,3	27
11	17:30	30	70	26	27	17,4	15,1	26
12	18:30	30	72	23	25	17,3	15,0	25
13	19:30	30	70	22	24	17,1	14,8	24

Continuación de la tabla VI.

14	06:00	21	60	25	27	17,1	14,8	17
15	07:00	30	65	25	27	16,5	14,4	18
16	08:00	30	70	25	27	16,0	14,0	19
17	09:00	30	71	26	27	16,0	14,0	21
18	10:00	31	70	23	25	15,8	13,8	21
19	11:00	32	72	22	24	15,4	13,6	28
20	12:00	32	70	21	23	15,4	13,6	27
21	13:00	33	70	25	26	15,1	13,4	28
22	14:00	31	72	26	28	15,1	13,4	28
23	15:00	29	70	26	28	14,6	13,0	27
24	16:00	29	60	26	28	14,6	13,0	27
25	17:00	29	65	25	27	14,3	12,8	26
26	18:00	29	61	25	27	14,2	12,8	25
27	19:00	29	61	25	27	14,0	12,6	24
28	07:00	20	61	26	27	13,8	12,4	16
29	08:00	24	51	23	25	13,3	12,0	17
30	09:00	28	81	23	25	12,9	11,8	18
31	10:00	28	61	22	24	12,5	11,4	22
32	11:00	28	60	25	27	12,4	11,4	25
33	12:00	29	65	25	27	12,2	11,2	27
34	13:00	28	70	25	27	11,8	11,0	28

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Los resultados deben ser exactos ya que por el tipo de proceso es importante que se realice evitando errores; para ello se calcula el número de corridas adecuado, con un nivel de confianza del 95 % que equivale a la proporción de éxito y una proporción de fracaso de 5 % con un error máximo de 45 % ya que por ser un proceso muy costoso de realizar es importante tener en cuenta que se manejó un índice de error.

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * P * q}{E^2}$$

[Ecuación 1]

Donde:

N = número de corridas

Z $\alpha/2$ = nivel de confianza (según tablas de distribución norma Z = 1,96)

P = probabilidad de éxito

q = probabilidad de fracaso

E = error máximo (45 %)

Si se desea una probabilidad de éxito del 95 %, entonces se tendrá una probabilidad de fracaso del 5 % y si desea que el error estimado sea del 5 % tenemos:

$$N = \frac{1,96^2(0,95)(0,05)}{0,45^2} = 0,9011 \approx 1$$

Se trabajó con una corrida

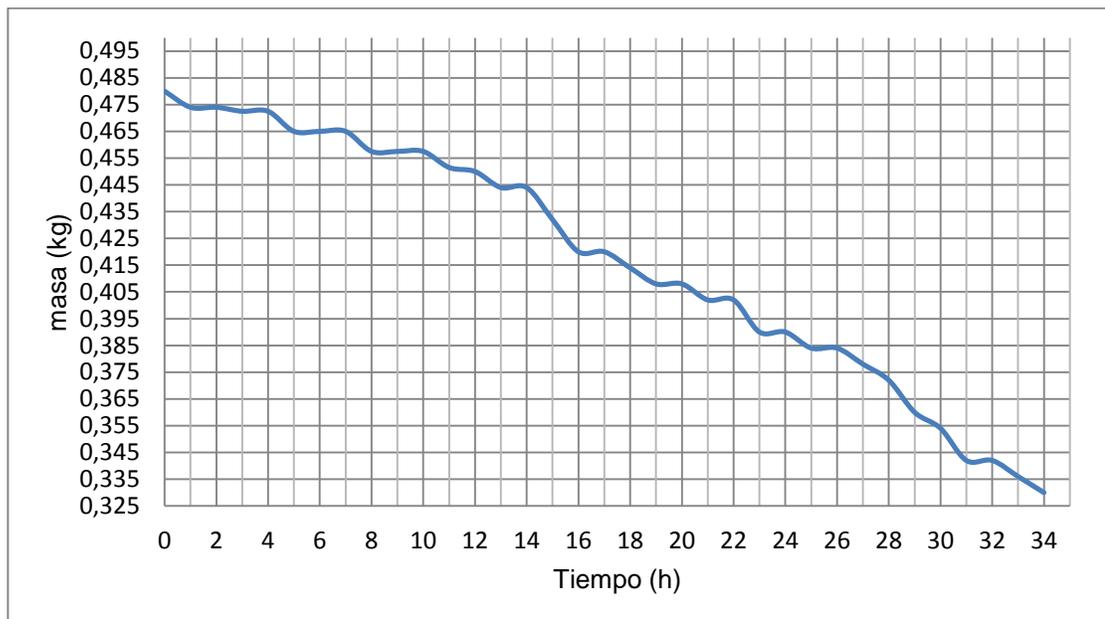
4. RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación, revelan el comportamiento experimental de la pérdida de masa del café en pergamino en función de variables controladas, durante todo el proceso.

4.1. Curvas de secado

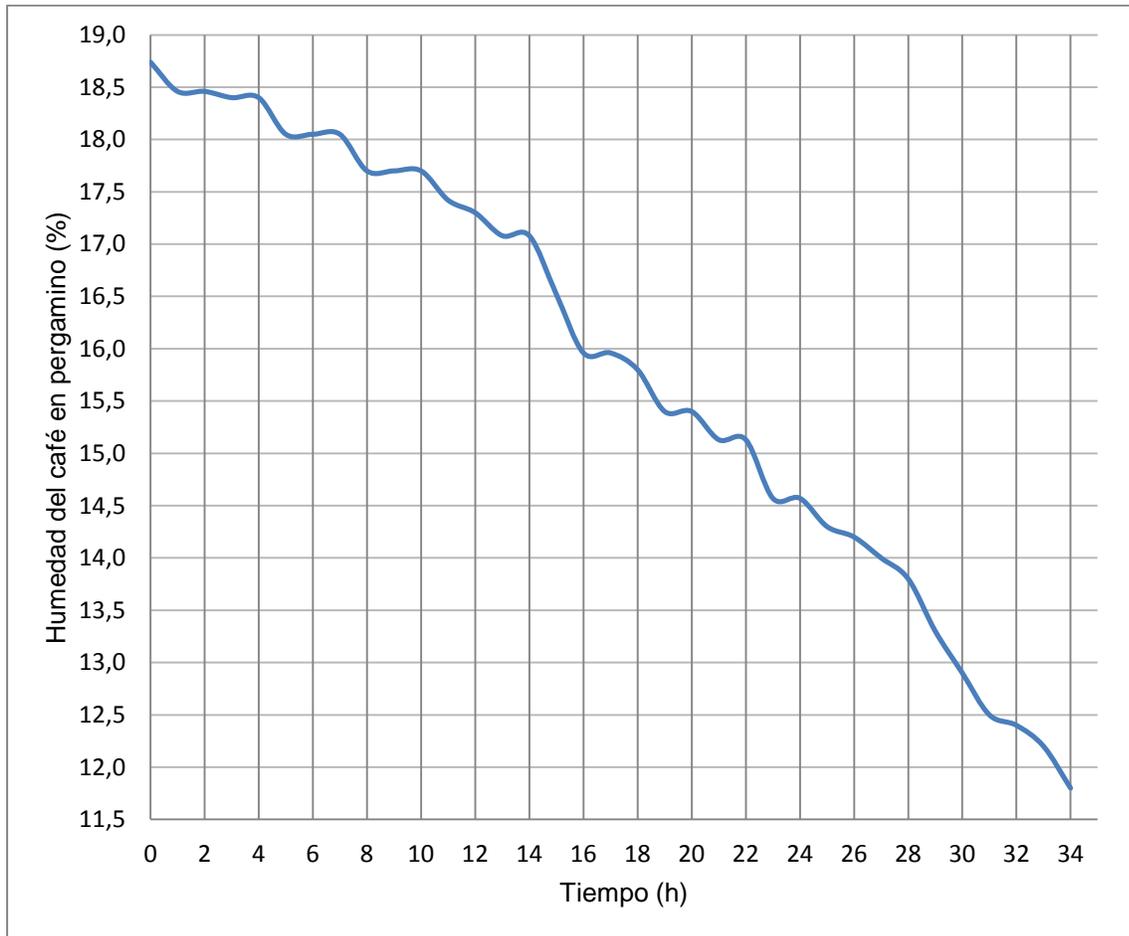
Las curvas de secado muestran el comportamiento de extracción de agua líquida por medio del aire caliente a través del mecanismo de secado.

Figura 7. **Masa del sólido en función del tiempo**



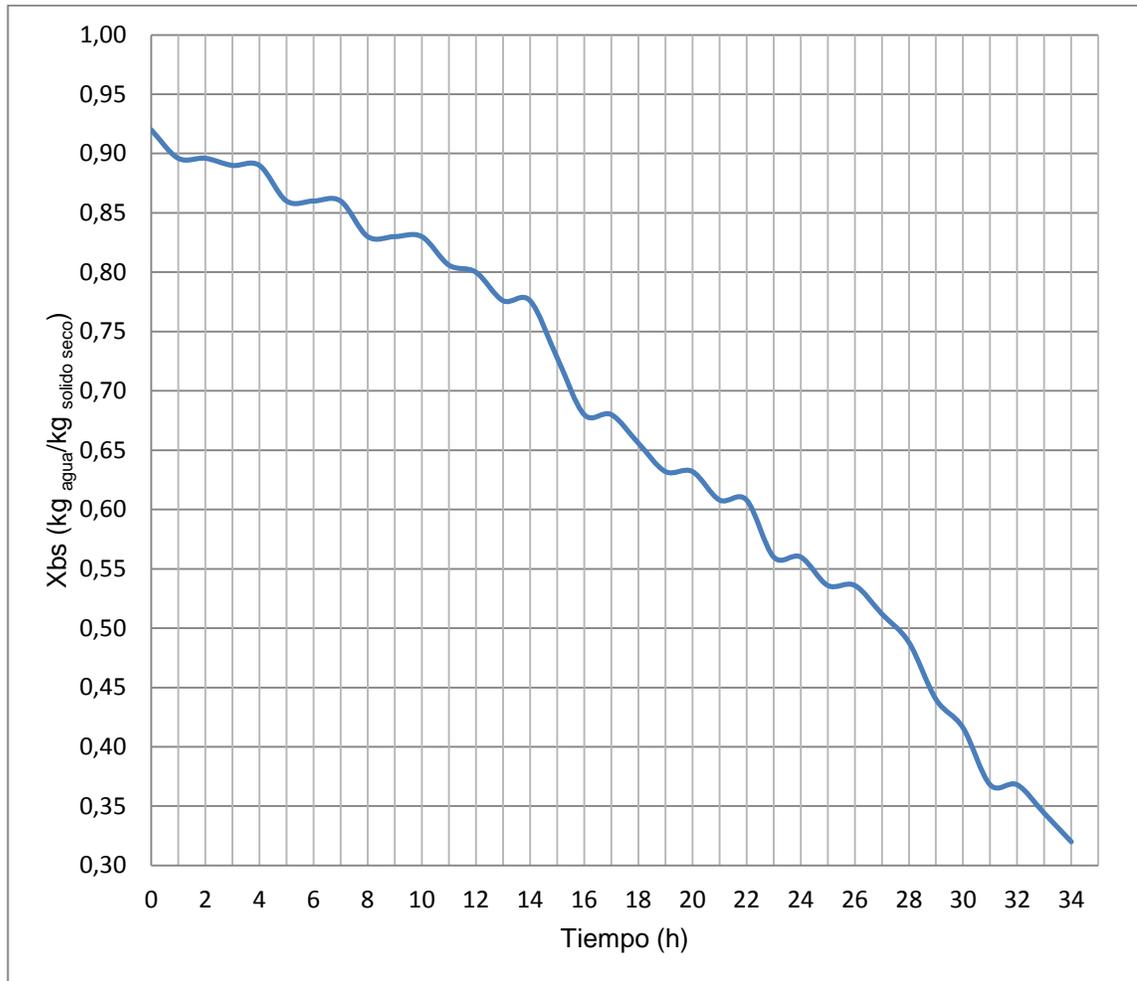
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Humedad del grano en función del tiempo**



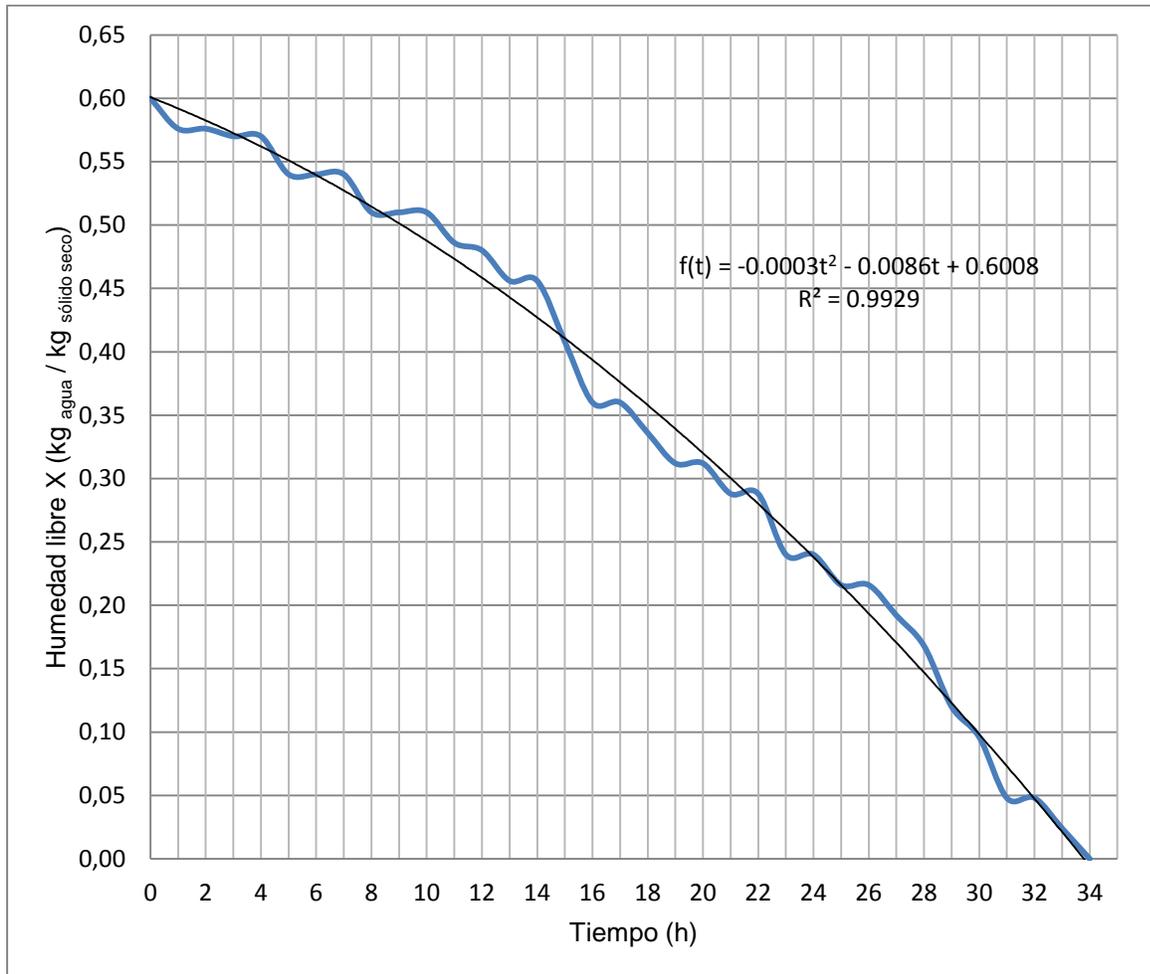
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Fracción en base seca en función del tiempo



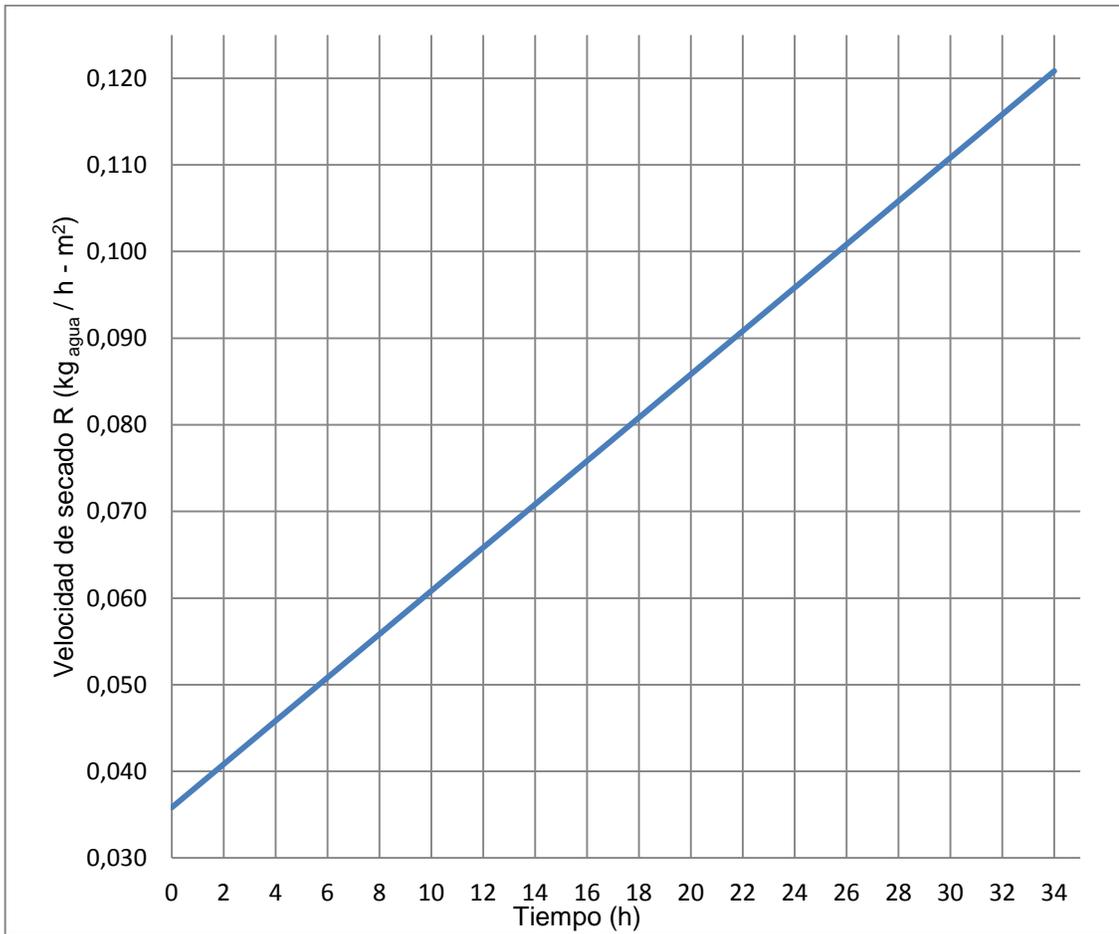
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Humedad libre en función del tiempo



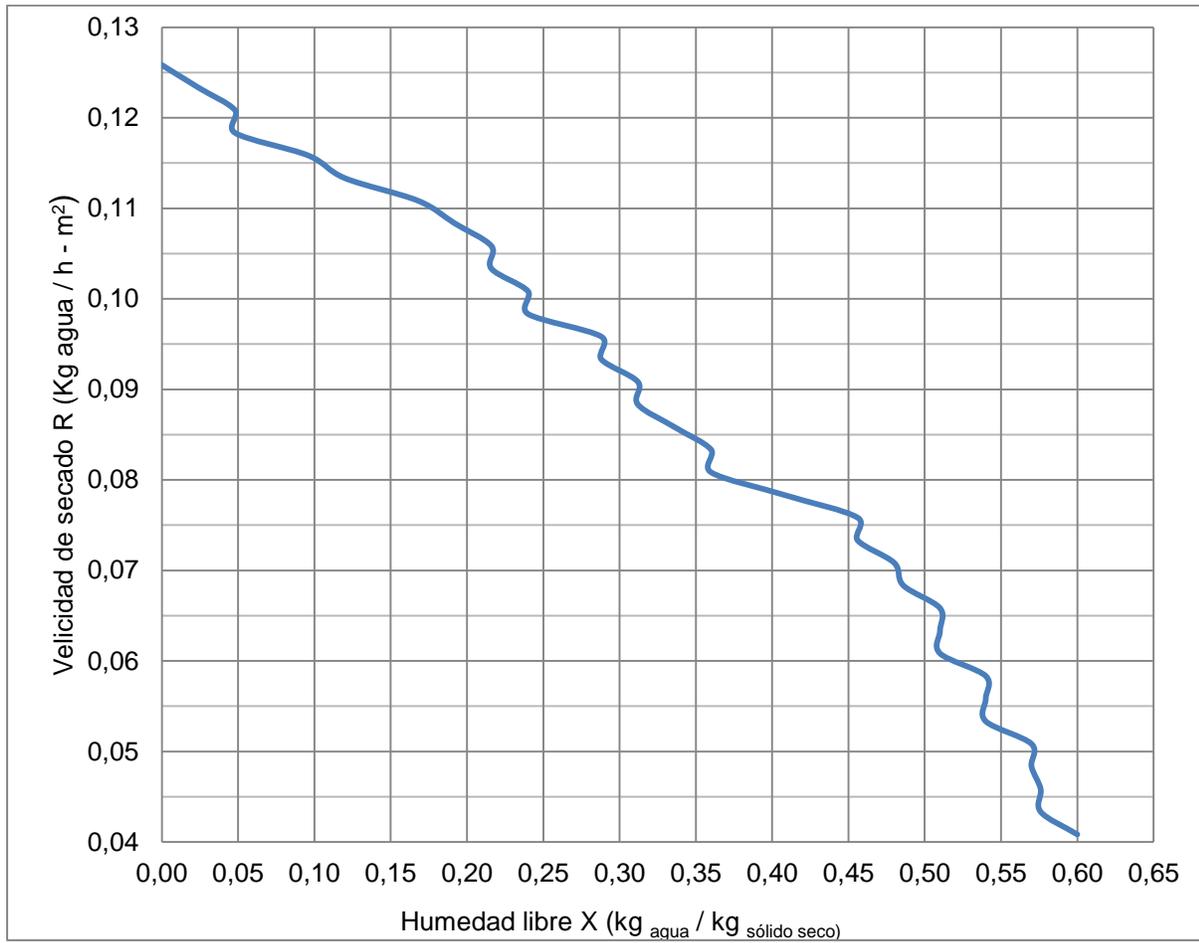
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Velocidad de secado en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Velocidad de secado en función de la humedad libre



Fuente: elaboración propia.

4.2. Tiempo de secado

El tiempo de secado, es el tiempo necesario para secar un lote de café y llevarlo desde una humedad del 18 % hasta 12 %. Haciendo uso de los recursos que proporciona la leña como su energía.

Tabla VII. **Comparación de tiempos de secado**

Tiempo Empírico (h)	Tiempo Experimental (h)
34,0	34,0126

Fuente: elaboración propia con datos de la tabla VI, ecuaciones 10 y 11.

4.3. Consumo de energía para secar un lote

Esta es la energía que aporta el combustible sólido, que en este caso es la leña, esta energía depende de su humedad. El consumo de leña es un proceso continuo, en que cada cierto tiempo ingresa al horno una cantidad pertinente de combustible sólido.

Tabla VIII. **Energía consumida**

Energía (kj)
8 703,457

Fuente: elaboración propia, ecuación 11.

4.4. Eficiencia térmica del secador

La eficiencia térmica de un equipo, es un coeficiente calculado como el cociente de la energía producida (en un ciclo de funcionamiento) y la energía aprovechada durante el secado (para que logre completar el ciclo termodinámico). Para este caso la energía producida es la energía consumida que es generada por el combustible sólido y la energía aprovechada es la que se utilizo para extraer el agua del sólido.

Tabla IX. Eficiencia térmica del equipo

Eficiencia (%)
45

Fuente: elaboración propia, ecuación 16.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La figura 7 muestra la masa del sólido en función del tiempo, muestra que conforme avanza el tiempo va perdiendo masa en forma de agua evaporada por medio del aire caliente que entra al equipo, se puede afirmar que la masa del sólido dentro del equipo es inversamente proporcional a tiempo. La figura no es uniforme sino que muestran fluctuaciones en su trazado debido al combustible sólido (leña) que se utilizó para calentar el aire, el calentamiento no fue constante debido al exceso de aire que se utilizó para llevar a cabo la combustión, este fue variando de modo que las temperaturas de entrada también lo fueron.

La figura 8 muestra la pérdida de humedad del sólido en función del tiempo, es una figura similar a la figura 7 debido a que la pérdida de humedad dependía de la temperatura que llevaba consigo el aire de entrada al equipo. La fracción en base seca que se muestra en la figura 9 da a conocer cómo pierde agua en forma de vapor a través del tiempo mostrando siempre el comportamiento irregular que se debe al tipo de combustible.

Como el aire que entra a un secador no suele entrar completamente seco, sino que contiene algo de humedad relativa, el contenido de humedad del sólido que sale del secador no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad del sólido que entra. La figura 10 muestra la diferencia entre el contenido de agua del sólido y la porción de agua del sólido que no puede ser separada por el aire que entra, debido a la humedad de éste (humedad de equilibrio), esta diferencia se llama humedad libre, conforme avanza el tiempo.

La figura 11 se lee de derecha a izquierda mostrando que la velocidad de secado comienza a disminuir en un período de velocidad decreciente hasta llegar al tiempo cero, la figura 12 muestra la curva de velocidad de secado frente al tiempo de secado para una condición constante, conforme avanza el tiempo la pérdida de humedad se hace menor para un área determinada de 0.06 m^2 por tiempo, el área es la de la bandeja que se utilizó para secar completamente un volumen de 1 lb de café en pergamino.

El tiempo empírico que se utiliza en el beneficio de café es de 34 horas, es un tiempo que se ha demostrado experimentalmente a partir de la figura 11 de velocidad de secado, estos tiempos concuerdan, con lo que se puede afirmar que el proceso se está llevando adecuadamente para obtener la humedad deseada.

La eficiencia del equipo es del 45 % es baja debido al combustible que se utiliza que tiene un poder calorífico bajo en comparación con los combustibles utilizados en la industria, (bunker, propano, GLP, etc.) y además este tipo de combustible sólido cuenta con un porcentaje de humedad que todavía lo hace más ineficiente, pero para el caso de secado funciona muy bien. Esta eficiencia se calculó a partir del calor necesario para secar y la energía real aportada por la leña.

CONCLUSIONES

1. Las curvas de secado mostraron el comportamiento que tuvo el sólido en función de los cambios físicos que sufrió en relación a la manipulación de las propiedades del aire de entrada al secador.
2. El tiempo de retención experimental calculado fue de 34 horas.
3. El tiempo empírico usado es el mismo que el tiempo experimental calculado por lo que se afirma que el proceso se está llevando adecuadamente cumpliendo con el objetivo de llevar el grano a un porcentaje de humedad de 12 % en el tiempo estipulado.
4. La energía consumida por un lote de secado es de 8 703,457 kj.
5. La eficiencia térmica del equipo es de 45 %.

RECOMENDACIONES

1. Instalar otra tubería de aire en el otro extremo del secador de modo que tenga dos entradas de aire, utilizando el mismo aire caliente para secar de los dos lados.
2. Secar al sol la leña antes de quemarla en el horno, para aumentar el poder calorífico del combustible sólido.
3. Secar por más tiempo el café en el patio para que cuando ingrese al secador lo haga con una menor humedad y así reducir el consumo de energía para secar.
4. Usar el calor de los gases de combustión para recalentar el aire que se ingresa al horno por medio del ventilador.

BIBLIOGRAFÍA

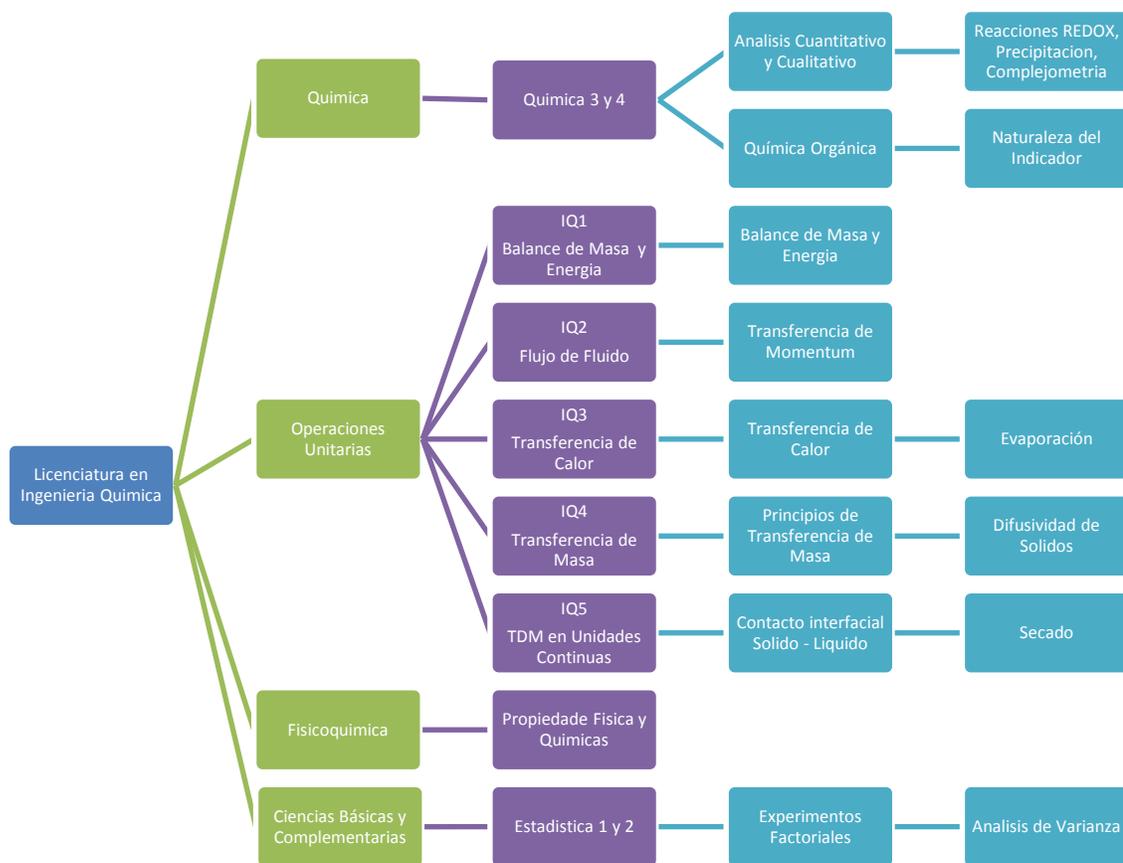
1. Consejo Cafetalero Nacional. *Influencia de Métodos de Beneficio Sobre la Calidad Organoléptica del Café Robusta*. Ecuador: COFENAC, 2010. 22 p.
2. Departamento de Agricultura. *Secado de Granos a Altas Temperaturas* Depósito de Documentos de la FAO [en línea] <<http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S05.htm>> [Consulta: 30 de octubre de 2012].
3. GEANKOPLIS, Christie John. *Procesos de Transporte y Principios de procesos de Separación*. 4a ed. México: CECSA, 2006. 1034 p. ISBN 970-24-0856-3.
4. LÓPEZ, José Costa. *Curso de Ingeniería Química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transportes*. España: Revereté, 2004. 427 p. ISBN 84-291-7126-6.
5. OROZCO HINCAPIÉ, Carlos Alberto. *Cálculo del Flujo Másico y Caudal de Aire para un Ventilador en Silos para Secado para Café*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira Colombia, Facultad de Ingeniería, 2007. 148 p.

6. ROBERT H., Perry. *Manual del Ingeniero Químico*. 7a ed. España: McGraw-Hill, 2001. 859 p. Vol. 2. ISBN: 84-481-3334-9.
7. TOLEDO GIRÓN, Cintya Lizbeth. *Proyecto de Beneficio Ecológico de Café en Aldea Plan de Sánchez, Rabinal, Salamá Baja Verapaz*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 140 p.
8. TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1995. 858 p. ISBN 968-6046-34-8.
9. WARREN L., McCabe. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1995, 1112 p. ISBN 84-7615-700-2.

APÉNDICE

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos

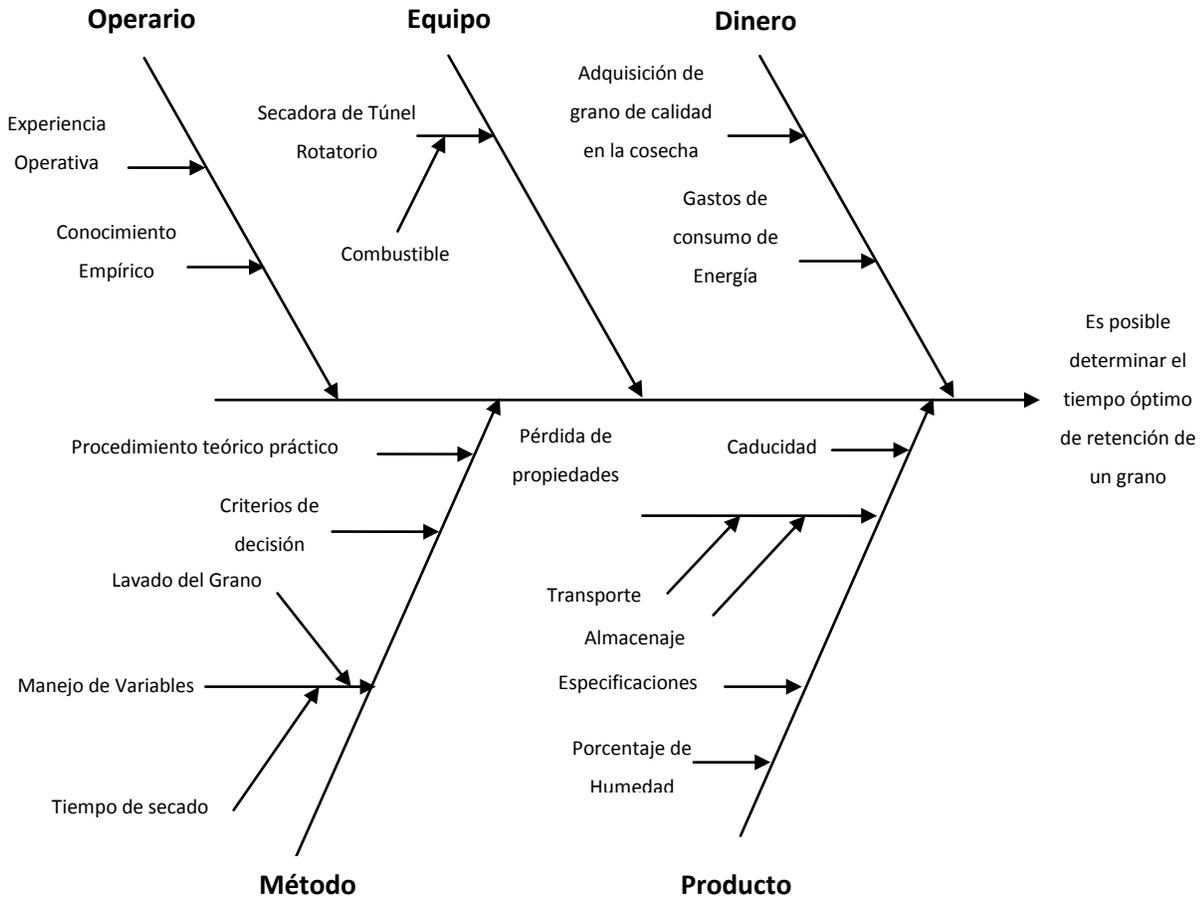
Figura 13. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa

Figura 14. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

- **Propiedades del aire de entrada y salida del equipo**

Para obtener las propiedades del aire de entrada y salida, fue necesario el uso de un software (*Syt Soft Psychrometric Chart 2.2*) que a partir de la altitud sobre el nivel del mar, se obtuvo el diagrama psicrométrico con el cual se determinó las propiedades del aire a partir de los datos de bulbo húmedo y bulbo seco.

- **Conversión de unidades de onzas a kilogramos**

$$16 \text{ oz} * \frac{0,03 \text{ kg}}{1 \text{ oz}} = 0,48 \text{ kg}$$

[Ecuación 2]

Donde:

oz = onzas

kg = kilogramos

Nota: de la misma forma se realizó la conversión de los datos de la masa de la muestra del grano.

- **Contenido de humedad del sólido en base seca.**

$$X_{bs} = \frac{m_{t=0} - m_{SS}}{m_{SS}} * 100$$

[Ecuación 3]

Donde:

X_{bs} = fracción de humedad en base seca [kg_{agua} / kg_{sólido seco}]

$m_{t=0}$ = masa seca en tiempo = 0 [kg]

m_{SS} = masa sólido seco

Ejemplo: determinación de la fracción de humedad del sólido en base seca para los siguientes datos: $m_{t=0} = 0,48$ kg $m_{SS} = 0,25$ kg

$$X_{bs} = \frac{0,48 - 0,25}{0,25} * 100 = 92 \%$$

- **Contenido de humedad del sólido en base húmeda.**

$$X_{bh} = \frac{m_{t=0} - m_{SS}}{m_{t=0}} * 100$$

[Ecuación 4]

Donde:

X_{bh} = fracción de humedad en base húmeda [kg_{agua} / kg_{sólido seco}]

$m_{t=0}$ = masa seca en tiempo = 0 [kg]

m_{SS} = masa sólido seco

Ejemplo: determinación de la fracción de humedad del sólido en base seca para los siguientes datos: $m_{t=0} = 0,48$ kg $m_{SS} = 0,474$ kg.

$$X_{bh} = \frac{0,48 - 0,474}{0,48} * 100 = 1,25$$

- **Cálculo de humedad en el equilibrio**

$$X^* = \frac{m_f - m_{ss}}{m_{ss}}$$

[Ecuación 5]

Donde:

X^* = humedad en el equilibrio [kg agua/kg sólido seco]

m_f = masa de la última corrida [kg]

m_{ss} = masa de sólido completamente seco [kg]

Ejemplo: determine la humedad en el equilibrio para los siguientes datos: masa en la última corrida 0,33 kg, masa del sólido completamente seco 0,25 kg.

$$X^* = \frac{0,33 - 0,25}{0,25} = 0,32$$

- **Cálculo de humedad libre**

$$X = X_{ss} - X^*$$

[Ecuación 6]

X = humedad libre, [kg agua/kg sólido seco]

X_{ss} = humedad en base seca de cada corrida, [kg agua/kg sólido seco]

X^* = humedad en el equilibrio, [kg agua/kg sólido seco]

Ejemplo: determine la humedad libre con los datos anteriores.

$$X = 0,92 - 0,32 = 0,6$$

- **Velocidad de secado**

Para calcular la velocidad de secado partimos de la ecuación de la recta proporcionada por la figura X que es la siguiente:

$$f t = -0,0003t^2 - 0,0086t - 0,6008$$

[Ecuación 7]

Luego derivamos la ecuación 7 para t como sigue:

$$\frac{dx}{dt} = -0,0006t - 0,0086$$

[Ecuación 8]

Donde

t = tiempo [h]

Hacemos uso de la ecuación de velocidad de secado como sigue:

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dx}{dt}$$

[Ecuación 9]

Donde

R = Velocidad de secado [kg_{agua} / (h · m²)]

L_s = Sólido completamente seco [0,25 kg]

A = Área de secado [0,06 m²]

dx / dt = Ecuación 8 valuada en el tiempo t

Ejemplo: calcule la velocidad de secado para un tiempo $t = 0$ h

$$f(t) = \frac{dx}{dt} = -0,0006t - 0,0086$$

$$f(0) = -0,0006(0) - 0,0086$$

$$\frac{dx}{dt} = -0,0086$$

$$R = -\frac{0,25 \text{ kg}}{0,06 \text{ m}^2} (-0,0086)$$

$$R = 0,036 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{h} - \text{m}^2}$$

Nota: de esta forma se calculó la velocidad de secado para cada tiempo.

- **Determinación experimental del tiempo de secado**

Para determinar el tiempo de secado partimos de la figura 11 y los siguientes datos área de bandeja $0,06 \text{ m}^2$ y masa de sólido completamente seco $0,25 \text{ kg}$.

$$R = -\frac{L_s \Delta X}{A \Delta t}$$

[Ecuación 10]

R = Velocidad de secado [$\text{kg}_{\text{agua}} / (\text{h} - \text{m}^2)$]

L_s = Sólido completamente seco [$0,25 \text{ kg}$]

A = Área de secado [$0,06 \text{ m}^2$]

$\Delta X / \Delta t$ = pendiente de la figura 11

Ecuación de tiempo de secado.

$$t = \frac{-L_s}{A * R_L} (X1 - X2)$$

[Ecuación 11]

Donde:

t = Tiempo de secado [h]

R = Velocidad de secado [$\text{kg}_{\text{agua}} / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$]

L_s = Sólido completamente seco [0,25 kg]

A = Área de secado [$0,06 \text{ m}^2$]

X1 = Humedad libre inicial, ver figura 12 [$\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{sólido seco}}$]

X2 = Humedad libre final, ver figura 12 [$\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{sólido seco}}$]

Ejemplo: determine el tiempo de secado usando las ecuaciones 10 y 11 para los siguientes datos, área $0,06 \text{ m}^2$, un peso de sólido completamente seco de 0,25 kg y fracciones $X1 = 0$, $X2 = 0.6$, $t1 = 0$, y $t2 = 34$.

$$R = - \frac{0,25}{0,06} \frac{0,0 - 0,6}{34 - 0} = 0,0735 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{h} - \text{m}^2}$$

$$t = \frac{-0,25 \text{ kg}_{\text{sólido seco}}}{0,06 \text{ m}^2 * 0,0735 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{h} - \text{m}^2}} 0 - 0,6 \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sólido seco}}}$$

$$t = 34,0136 \text{ h}$$

Tiempo experimental 34 horas.

- **Cálculo de consumo de energía para el proceso de secado**

Para determinar el cálculo de energía que se necesita para el proceso de secado partimos de la masa del combustible y su poder calorífico, usando los datos de la tabla XIII y tabla IV.

$$1\ 245\ lb * \frac{0,45359\ kg}{1\ lb} * 15\ 412\ \frac{kJ}{kg} = 8\ 703,457\ kJ$$

[Ecuación 11]

- **Cálculo de la eficiencia del secador**

Para determinar el cálculo de la eficiencia del secador partimos del balance general de masa y energía.



$$F_{entrada} + G_{entrada} = F_{salida} + G_{salida}$$

[Ecuación 12]

Donde:

G = masa de aire caliente

F = masa de sólido

$$\begin{aligned}
 F + G &= F + G \\
 X_{BSE}F + GH_e &= X_{BSS}F + GH_s \\
 X_{BSE}F - X_{BSS}F &= GH_s - GH_e \\
 F X_{BSE} - X_{BSS} &= G(H_s - H_e)
 \end{aligned}$$

[Ecuación 13]

Donde:

F = masa de sólido [kg]

X_{BSE} = fracción de sólido húmedo [kg agua /kg sólido seco]

X_{BSS} = fracción de sólido húmedo [kg agua /kg sólido seco]

G = masa de aire seco requerido [kg]

H_s = relación de humedad de salida [kg agua /kg aire seco]

H_e = relación de humedad de entrada [kg agua /kg aire seco]

$$G' = G + G(H_s - H_e)$$

[Ecuación 14]

Donde:

G' = masa de aire del ambiente [kg]

G = masa de aire seco requerido [kg]

H_s = relación de humedad de salida [kg agua /kg aire seco]

H_e = relación de humedad de entrada [kg agua /kg aire seco]

Nota: la relación de humedad de entrada y salida de aire son datos tomados de la carta psicométrica (Anexo 1).

$$Q_s = G' \lambda$$

[Ecuación 15]

Q_s = Calor suministrado [kj]

G' = masa de aire del ambiente [kg]

λ = entalpia de vaporización del agua a temperatura promedio de entrada y salida [kj/kg]

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_r}$$

[Ecuación 16]

Donde:

η = Eficiencia térmica [adimensional]

Q_s = Calor suministrado [kj]

Q_r = Calor real [kj]

Nota: el calor real se calcula a partir de la masa del combustible sólido y su poder calorífico. Ver ecuación 11.

Ejemplo: determinar la eficiencia del secador con los siguientes datos. Sólido húmedo 120 quintales, sólido seco 98 quintales, humedad inicial y final del sólido 18,7 y 11,8 temperatura de entrada del aire promedio de todas las corridas 65 °C, temperatura de salida del aire promedio de todas las corridas 25,77 °C, humedad de entrada del aire y salida del aire 8,18 % y 87,0345 % y una masa de 1 245 lb de leña de pino al 20 % de humedad.

Sólido + agua = 120 quintales

Sólido seco = 98 quintales

$$\%h_e = \frac{\text{agua}}{\text{agua} + \text{sólido}}$$

$$\text{agua} = \%h_e * (\text{agua} + \text{sólido})$$

$$\text{agua} = 0,187 * 120$$

$$\text{agua contenida} = \mathbf{22,44\text{quintales}}$$

$$\text{Sólido seco}_{\text{humedad final}} = 120 - 22,44$$

$$\text{Sólido seco}_{\text{humedad final}} = \mathbf{97,56\text{quintales}}$$

$$\%h_f = \frac{\text{agua}}{\text{agua} + \text{sólido}}$$

$$\text{agua} = \%h_f * (\text{agua} + \text{sólido})$$

$$\text{agua} = 0,118 * 97,56$$

$$\text{agua contenida} = \mathbf{11,51\text{quintales}}$$

$$\text{Sólido completamente seco} = 97,56 - 11,51$$

$$\text{Sólido completamente seco} = \mathbf{86,048\text{quintales}}$$

Datos	Masa inicial (quintales)	Masa final (quintales)
Sólido húmedo	120	97,6
Sólido seco	86,048	86,048
Agua contenida	33,952	11,552

$$86,048 \text{ quintales} * \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ quintal}} * \frac{0,45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} = 3\,903,0512 \text{ kg}$$

$$33,952 \text{ quintales} * \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ quintal}} * \frac{0,45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} = 1\,540,0288 \text{ kg}$$

$$11,552 \text{ quintales} * \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ quintal}} * \frac{0,45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} = 523,987 \text{ kg}$$

$$120 \text{ quintales} * \frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ quintal}} * \frac{0,45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} = 5\,443,08 \text{ kg}$$

Datos del aire	Entrada	Salida
Temperatura [°C]	65,3428	25,77
Humedad [%]	8,18	87,0345
Relación de humedad [g _{agua} / kg _{aire seco}]	15,1999	21,27

$$F X_{BSE} - X_{BSS} = G(H_s - H_e)$$

$$G = \frac{3\,903,051 \text{ kg}_{\text{agua}} \frac{1\,540,0288 \text{ kg}_{\text{agua_evap}}}{3\,903,051 \text{ kg}_{\text{agua}}} - \frac{523,987 \text{ kg}_{\text{agua_evap}}}{3\,903,051 \text{ kg}_{\text{agua}}}}{\frac{21,27 \text{ g}_{\text{agua}} * \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}}{\text{kg}_{\text{aire_seco}}} - \frac{15,1999 \text{ g}_{\text{agua}} * \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}}{\text{kg}_{\text{aire_seco}}}}$$

$$G = 167\,384 \text{ kg}_{\text{aire_seco}}$$

$$G' = G + G(H_s - H_e)$$

$$G' = G \left(1 + \frac{H_s - H_e}{H_e} \right)$$

$$G' = 167\,384 \text{ kg_aire_seco} \left(1 + \frac{21,27 \text{ g_agua} * \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}}{\text{kg_aire_seco}} - \frac{15,1999 \text{ g_agua} * \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}}{\text{kg_aire_seco}} \right)$$

$$G' = 168\,400,7139 \text{ kg_aire}$$

$$T_e = 65,343 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 25,771 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{prom} = \frac{65,343 + 25,771}{2} = 45,557$$

$$\text{Calor de vaporización del agua a } T_{prom} = 2\,352,6762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_s = G' \lambda$$

$$Q_s = 168\,400,7139 \text{ kg_aire} * 2\,352,6762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_s = 396\,192\,351,656 \text{ kJ}$$

$$Q_r = 1\,245 \text{ lb} * \frac{0,45359 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} * 15\,412 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_r = 8\,703,457.705 \text{ kJ}$$

$$\eta = \frac{396\,192\,351,656 \text{ kJ}}{8\,703\,457,705 \text{ kJ}}$$

$$\eta = 45 \%$$

La eficiencia térmica del secador es de 45 %.

Apéndice 4. Datos calculados

Tabla X. Propiedades del aire de entrada a presión constante
(87 662,089 Pa)

Tbs (°C)	Tbh (°C)	Hr (%)	H (kJ/kg _{aire seco})	V (m ³ /kg _{aire seco})	Tr (°C)	ρ (kg _{aire seco} /m ³)	P* (Pa)
47	21	9,671	66,494	1,061	7,385	0,943	1 032,352
61	31	13,537	115,870	1,131	23,125	0,884	2 842,417
61	31	13,537	115,870	1,131	23,125	0,884	2 842,417
61	31	13,537	115,870	1,131	23,125	0,884	2 842,417
51	21	6,192	66,350	1,073	3,845	0,934	807,431
81	31	3,488	114,788	1,183	15,164	0,845	1 729,734
61	32	15,072	122,272	1,135	24,912	0,881	3 164,691
60	31	14,454	115,924	1,128	23,446	0,887	2 898,154
65	32	11,686	122,045	1,146	23,696	0,873	2 492,168
70	30	6,475	109,298	1,150	17,685	0,869	2 031,120
71	30	6,032	109,243	1,153	17,245	0,867	1 975,410
70	30	6,475	109,298	1,150	17,685	0,869	2 031,120
72	30	5,616	109,191	1,554	16,794	0,865	1 919,709
70	30	6,475	109,298	1,150	17,685	0,869	2 031,120
60	21	1,503	66,030	1,095	-8,360	0,914	301,440
65	30	9,175	109,556	1,137	19,740	0,879	2 309,814
70	30	6,475	109,298	1,150	17,685	0,869	2 031,120
71	30	6,032	109,243	1,153	17,245	0,867	1 975,410
70	31	7,464	115,379	1,154	19,958	0,866	2 341,244
72	32	7,469	121,650	1,164	21,363	0,859	2 553,136
70	32	8,493	121,763	1,159	22,059	0,863	2 664,240
70	33	9,566	128,463	1,163	24,023	0,859	3 000,633
72	31	6,522	115,271	1,160	19,175	0,862	2 299,979
70	29	5,526	103,495	1,146	15,197	0,872	1 733,357

Continuación de la tabla X.

60	29	11,429	103,999	1,120	19,613	0,893	2 291,651
65	29	7,993	103,746	1,133	17,539	0,882	2 012,379
61	29	10,648	103,948	1,123	19,216	0,891	2 235,776
61	29	10,648	103,948	1,123	19,216	0,891	2 235,776
61	20	0,183	62,149	1,095	29,937	0,914	38,423
51	24	11,343	79,033	1,079	12,754	0,926	1 479,076
81	28	1,681	97,438	1,171	4,301	0,854	833,767
61	28	9,289	98,399	1,119	17,044	0,894	1 950,409
60	28	10,006	98,448	1,116	17,491	0,896	2 006,343
65	29	7,993	103,746	1,133	17,539	0,882	2 012,379
70	28	4,614	10,442	1,142	12,425	0,875	1 447,460

Fuente: diagrama psicrométrico del aire – vapor de agua a presión constante 87 662,089 Pa proporcionado por Syt Soft Psychrometric Chart 2.2 Anexo 1.

Tabla XI. **Propiedades del aire de salida a presión constante (87 662,089 Pa)**

Tbs (°C)	Tbh (°C)	Hr (%)	h (kJ/kg _{aire seco})	V (m ³ /kg _{aire seco})	Tr (°C)	ρ (kg _{aire seco} /m ³)	P* (Pa)
19	17	83,048	52,796	0,976	16,059	1,024	1 831,836
19	17	83,048	52,794	0,976	16,059	1,024	1 831,836
21	20	108,771	67,44	0,988	21,363	1,012	2 553,198
23	21	84,510	67,372	0,996	20,249	1,003	2 383,942
26	25	92,565	84,763	1,015	24,700	0,985	3 124,936
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,977	3 263,581
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,977	3 263,581
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,97	3 263,581
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	26	92,704	89,609	1,021	25,716	0,979	3 319,751
25	23	85,132	75,661	1,007	22,328	0,993	2 708,208

Continuación de la tabla XI.

24	22	84,829	71,426	1,001	21,290	0,998	2 541,746
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	26	92,704	89,609	1,021	25,716	0,979	3 319,751
25	23	85,132	75,661	1,007	22,328	0,993	2 708,207
24	22	84,829	71,426	1,001	21,290	0,998	2 541,746
23	21	84,510	67,372	0,996	20,249	1,003	2 383,942
26	25	92,565	84,763	1,015	24,700	0,985	3 124,936
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,977	3 263,581
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,977	3 263,581
28	26	85,954	89,562	1,023	25,428	0,977	3 263,581
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706
27	25	85,694	84,718	1,018	24,397	0,982	3 068,706

Fuente: diagrama psicrométrico del aire – vapor de agua a presión constante 87 662,089 Pa proporcionado por Syt Soft Psychrometric Chart 2.2 Anexo 1.

Tabla XII. **Fracción en base seca**

masa (oz)	masa (kg)	%H	Xbs
16,000	0,480	18,740	0,920
15,800	0,474	18,460	0,896
15,800	0,474	18,460	0,896
15,750	0,473	18,400	0,890
15,750	0,473	18,400	0,890
15,500	0,465	18,050	0,860
15,500	0,465	18,050	0,860
15,500	0,465	18,050	0,860
15,250	0,458	17,700	0,830
15,250	0,458	17,700	0,830

Continuación de la tabla XII.

15,250	0,458	17,700	0,830
15,050	0,452	17,420	0,806
15,000	0,450	17,300	0,800
14,800	0,444	17,080	0,776
14,800	0,444	17,080	0,776
14,400	0,432	16,520	0,728
14,000	0,420	15,960	0,680
14,000	0,420	15,960	0,680
13,800	0,414	15,800	0,656
13,600	0,408	15,400	0,632
13,600	0,408	15,400	0,632
13,400	0,402	15,130	0,608
13,400	0,402	15,130	0,608
13,000	0,390	14,570	0,560
13,000	0,390	14,570	0,560
12,800	0,384	14,300	0,536
12,800	0,384	14,200	0,536
12,600	0,378	14,000	0,512
12,400	0,372	13,800	0,488
12,000	0,360	13,300	0,440
11,800	0,354	12,900	0,416
11,400	0,342	12,500	0,368
11,400	0,342	12,400	0,368
11,200	0,336	12,200	0,344
11,000	0,330	11,800	0,320

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 2, 3 y 4.

Tabla XIII. **Humedad en equilibrio y humedad libre**

t (h)	M (kg)	X_{bs} (kg agua / kg sólido seco)	X* (Kg agua / kg sólido seco)	X (kg agua / kg sólido seco)
0	0,480	0,920	0,320	0,600
1	0,474	0,896	0,320	0,576
2	0,474	0,896	0,320	0,576
3	0,473	0,890	0,320	0,570
4	0,473	0,890	0,320	0,570
5	0,465	0,860	0,320	0,540
6	0,465	0,860	0,320	0,540
7	0,465	0,860	0,320	0,540
8	0,458	0,830	0,320	0,510
9	0,458	0,830	0,320	0,510
10	0,458	0,830	0,320	0,510
11	0,452	0,806	0,320	0,486
12	0,450	0,800	0,320	0,480
13	0,444	0,776	0,320	0,456
14	0,444	0,776	0,320	0,456
16	0,420	0,680	0,320	0,360
17	0,420	0,680	0,320	0,360
18	0,414	0,656	0,320	0,336
19	0,408	0,632	0,320	0,312
20	0,408	0,632	0,320	0,312
21	0,402	0,608	0,320	0,288
22	0,402	0,608	0,320	0,288
23	0,390	0,560	0,320	0,240
24	0,390	0,560	0,320	0,240
25	0,384	0,536	0,320	0,216
26	0,384	0,536	0,320	0,216
27	0,378	0,512	0,320	0,192
28	0,372	0,488	0,320	0,168
29	0,360	0,440	0,320	0,120
30	0,354	0,416	0,320	0,096
31	0,342	0,368	0,320	0,048

Continuación de la tabla XIII.

32	0,342	0,368	0,320	0,048
33	0,336	0,344	0,320	0,024
34	0,330	0,320	0,320	0.000

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 5 y 6.

Tabla XIV. **Velocidad de secado**

Tiempo (h)	masa (kg)	Humedad libre X (kg agua / kg sólido seco)	dx / dt	Velocidad de secado R (kg_{agua} / h·m²)
0	0,480	0,600	0,009	0,036
1	0,474	0,576	0,009	0,038
2	0,474	0,576	0,010	0,041
3	0,473	0,570	0,010	0,043
4	0,473	0,570	0,011	0,046
5	0,465	0,540	0,012	0,048
6	0,465	0,540	0,012	0,051
7	0,465	0,540	0,013	0,053
8	0,458	0,510	0,013	0,056
9	0,458	0,510	0,014	0,058
10	0,458	0,510	0,015	0,061
11	0,452	0,486	0,015	0,063
12	0,450	0,480	0,016	0,066
13	0,444	0,456	0,016	0,068
14	0,444	0,456	0,017	0,071
15	0,432	0,408	0,018	0,073
16	0,420	0,360	0,018	0,076
17	0,420	0,360	0,019	0,078
18	0,414	0,336	0,019	0,081
19	0,408	0,312	0,020	0,083
20	0,408	0,312	0,021	0,086
21	0,402	0,288	0,021	0,088
22	0,402	0,288	0,022	0,091
23	0,390	0,240	0,022	0,093

Continuación de la tabla XIV.

24	0,390	0,240	0,023	0,096
25	0,384	0,216	0,024	0,098
26	0,384	0,216	0,024	0,101
27	0,378	0,192	0,025	0,103
28	0,372	0,168	0,025	0,106
29	0,360	0,120	0,026	0,108
30	0,354	0,096	0,027	0,111
31	0,342	0,048	0,027	0,113
32	0,342	0,048	0,028	0,116
33	0,336	0,024	0,028	0,118
34	0,330	0,000	0,029	0,121

Fuente: elaboración propia basada en ecuaciones 8 y 9.

Tabla XV. **Datos del combustible sólido**

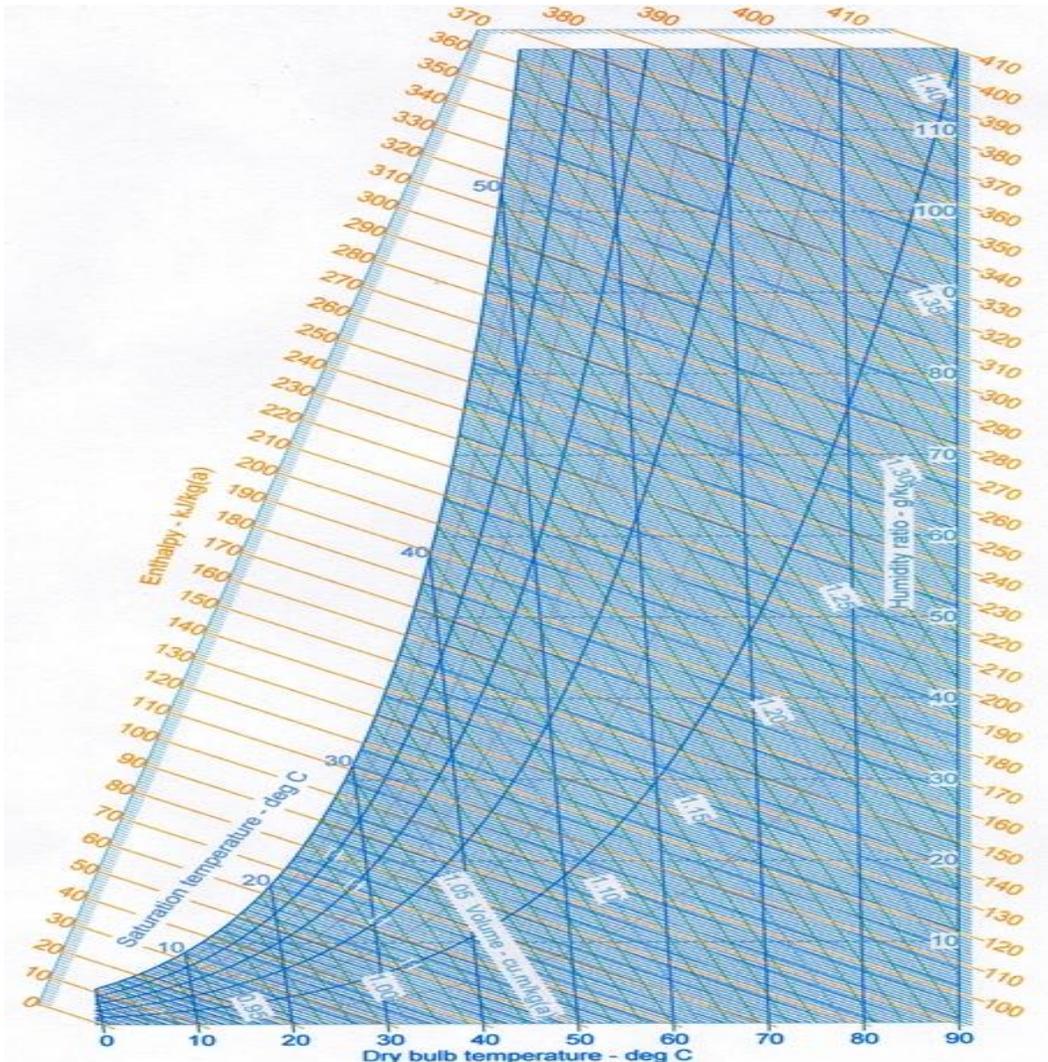
Tipo de Leña	Pino
Volumen de leña	1,5 m ³
Peso de leña (húmeda)	1 245 lb
Peso de leña (seca)	983 lb
humedad de leña	21 %
Peso de cenizas	76 lb

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Carta psicrométrica

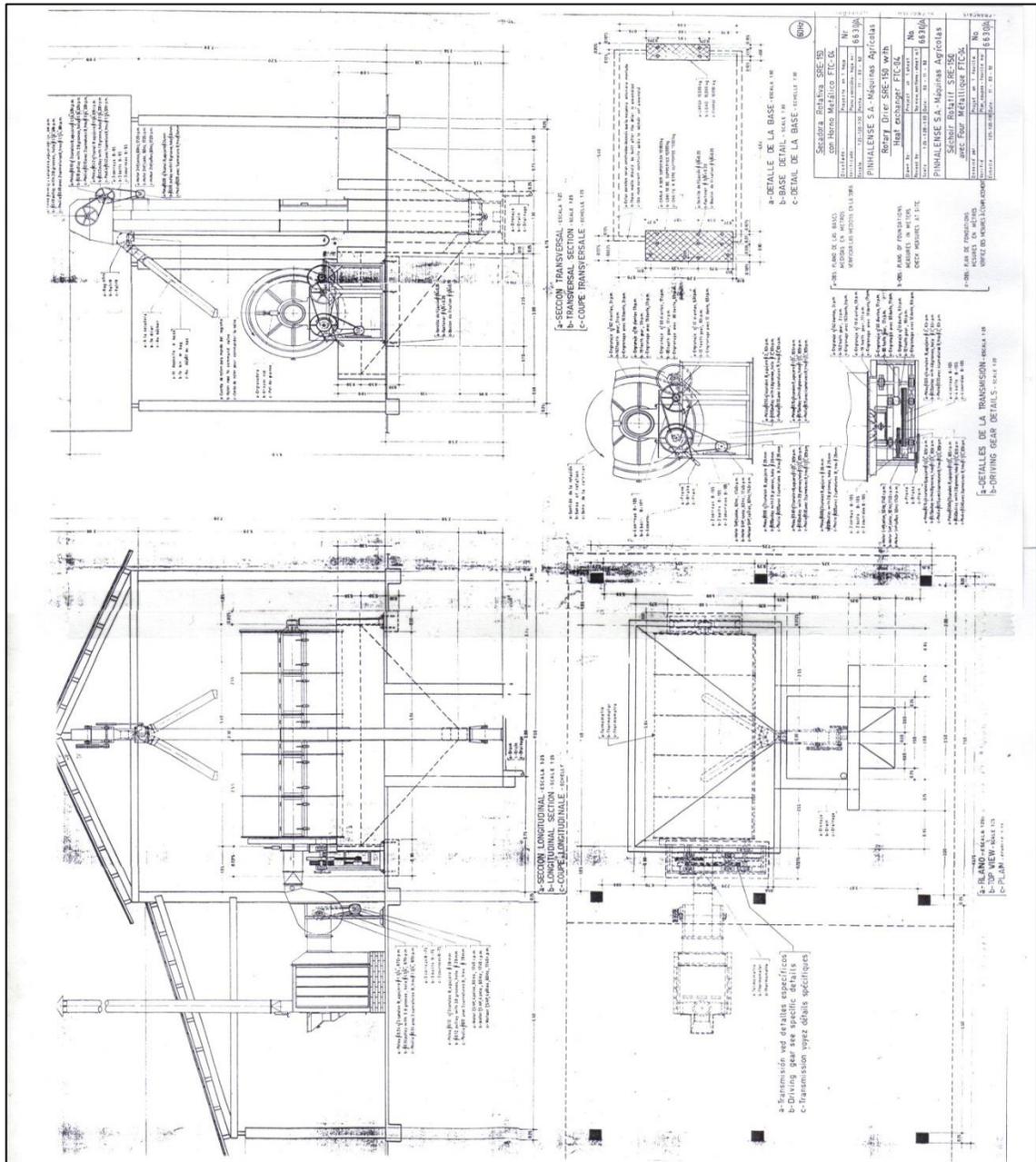
Figura 15. Carta psicrométrica a presión constante (87 6620,89 Pa)



Fuente: Syt Soft Psychrometric Chart 2.2.

Anexo 2. Equipo completo de secado

Figura 16. Plano del equipo de la secadora de guardiola



Fuente: beneficio de café.

Anexo 3. **Equipos utilizados**

Figura 17. **Secadora de guardiola**



Fuente: beneficio de café.

Figura 18. **Tolva de llenado**



Fuente: beneficio de café.

Figura 19. **Camión de llenado**



Fuente: beneficio de café.

Figura 20. **Torre de llenado**



Fuente: beneficio de café.

