



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS DE INVESTIGACIÓN:

**"DESARROLLO DE UN SECADOR SOLAR -
BIOMÁSICO ROTATORIO AUTOMATIZADO PARA EL
DESHIDRATADO DE GRANOS DE CAFÉ."**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS
ENERGETICOS RENOVABLES**

PRESENTA:

ING. OSCAR ARMANDO CONDE DÍAZ

DIRECTORES DE TESIS:

DR. ROILAN IGLESIAS DÍAZ

DR. JOEL MOREIR ACOSTA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2020



“Desarrollo de un Secador Solar – Biomásico Rotatorio Automatizado para el Deshidratado de Granos de Café”





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 23 de Noviembre de 2020

Oficio No. DGIP/CP/0180/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

C. Oscar Armando Conde Díaz Candidato al Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

UNICACH

P r e s e n t e

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **“Desarrollo de un secador solar-biomásico rotatorio automatizado, para el deshidratado de granos de café”**, cuyo director de tesis es el Dr. Roilan Iglesias Díaz, quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección General a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección General de un ejemplar empastado.

Atentamente

“Por la Cultura de mi Raza”



DIRECCION DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

Lic. Aurora Evangelina Serrano Roblero
Directora General

C.c.p. Dr. Pascual López de Paz. Director del IIIER UNICACH.-Para su conocimiento
Mtro. Luis A. Hernández Domínguez. Coordinador de la Maestría en MySER UNICACH.
Para su conocimiento.
Expediente * AESR/igp/rags



Dirección General de
Investigación
y **Posgrado**



Libramiento Norte Poniente No. 1150, Colonia Lajas Maciel
CP 29039, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Tel: (961)6170440 Ext. 4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

Agradecimiento

A mis padres Evaristo y María Luis, por darme la vida hermosa y el esfuerzo de haberme forjado, a todos mis hermanos y familiares que me brindaron sus hombros con palabras de aliento y motivándome en el camino correcto de la sabiduría, comprensión, paz y amor, para poder cumplir mis sueños y metas a salir adelante a pesar de los tropiezos y caídas, contando con su apoyo, manteniendo mi alma siempre positiva en todo momento de esta vida.

A mis directores de tesis: Dr. Roilan Iglesias Díaz y Dr. Joel Moreira Acosta, a mis revisores el Dr. Nein Farrera Vázquez y Dr. Pascual López de paz, como a mis asesores el Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz y Mtro. Marco Antonio Zúñiga Reyes, que me guiaron, colaboraron y apoyaron en su tiempo y experiencia compartida, motivándome a seguir un paso más en el portal de la investigación, Como también a todo el cuerpo académico y que conforma el IIIER de la UNICACH.

A los compañeros y amigos que me apoyaron a la realización de este proyecto, quienes sin esperar nada compartieron su conocimiento, apoyándome siempre en el transcurso de mi maestría.

Así mismo, un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido durante todo el proceso de formación profesional, para alcanzar el grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo cariño de mi corazón a mi hermosa familia Conde Díaz y en honor a mi hermano Román:

“Sonríe siempre por un mejor futuro para todos”

“Escucha-arte un momento bastará para seguir”

“Los tiempos de Dios son perfectos”

Abstract

In this work, the desing, construction and evaluation of an Automated Rotary Solar – Bomasic Dryer (SSBRA) are described for the dehydration of coffee beans, which allows improving the quality of the products as well as the drying process in the backyard, thus speeding up its drying time.

This devices uses a rotating cylindrical drying chamber, with two energy sources for air heating: the first energy source, is two subsystems of vacuum tubes connected in series and the second, is an auxiliary subsystem for the oxidation of biomass of firewood.

For the airflow that circulates in these two sources of air heating a conventional of air blower is used, which will push the air towards the vacuum tubes, then to the biomass firewood subsystem, so that it finally reaches the inside of the chamber drying.

The SSBRA has a speed reducer subsystem using pulleys and gears, a fully automated control subsystem, with communication to her user, allowing them to enter values and view all the data obtained from the reading of sensors strategically placed in the device, saving them in a micro SD memory, to later analyze the data by means of graphics. Within the automation it will be possible to control the working timer and the power distribution of its actuators (motor at its starter and the blower). By indirectly controllling the speed of the blower, it is possible to control the air flow that will travel inside the termal subsystems towards the drying chamber.

The entire SSBRA was evaluated by means of the automated control subsystem (SAC), under real operating conditions, with and without coffee load, then an analysis of the posible results was carried out, which allow us to improve and optimize, for the drying process of coffee beans with this device.

Keywords: Rotary dryer, solar and biomass energy, parchment coffee, automation.

Resumen

En el presente trabajo, se describe el diseño, la construcción y la evaluación, de un Secador Solar-Biomásico Rotatorio Automatizado (SSBRA), para la deshidratación de granos de café, que permita mejorar la calidad del producto como del proceso de secado a traspatio, agilizando así su tiempo de secado.

Este dispositivo utiliza una cámara de secado cilíndrica rotatoria, con dos fuentes de energía para el calentamiento de aire: la primera fuente de energía, son dos subsistemas de tubos al vacío conectados en serie y la segunda es un subsistema auxiliar de oxidación biomásico de leña. Para el flujo de aire que circula en estas dos fuentes de calentamiento de aire, se utiliza un soplador de aire convencional, el cual empujará el aire hacia los tubos al vacío, después al subsistema biomásico de leña, para que finalmente llegue al interior de la cámara de secado rotatoria. El SSBRA cuenta con un subsistema de reductor de velocidades mediante poleas y engranes, un subsistema de control totalmente automatizado, con comunicación al usuario, permitiéndole ingresar valores y visualizar todos los datos obtenidos de la lectura de sensores colocados estratégicamente en el dispositivo, guardándolos en una memoria micro SD, para después analizar los datos por medio de gráficos. Dentro de la automatización se podrá controlar los tiempos de trabajo y la distribución de potencia de sus actuadores (motor en su arranque y del soplador). Al controlar la velocidad del soplador indirectamente se puede controlar el flujo de aire que recorrerá en el interior de los subsistemas térmicos hacia la cámara de secado.

Todo el SSBRA se evaluó mediante el subsistema automatizado de control (SAC), en condiciones reales de operación, con y sin carga de café, luego se realizó un análisis de los posibles resultados, que nos permitan la mejora y optimización, para el proceso de secado de granos de café con este dispositivo.

Palabras claves: Secador rotatorio, energía solar y biomásico, café pergamino, automatización.

Índice general

Agradecimiento.....	III
Dedicatoria.....	IV
Abstract	V
Resumen	VI
Índice general.....	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIV
Capítulo 1: Generalidades	1
1.1- Introducción	1
1.2- Antecedentes	2
1.2.1- Secadores desarrollados en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER)	7
1.3- Problemática	9
1.4- Objetivo e hipótesis	10
1.4.1- Objetivo general	10
1.4.2.- Objetivos particulares	10
1.4.3- Hipótesis	11
1.6- Justificación	12
1.7- Conclusión	13
Bibliografía	14
Capítulo 2. Fundamentación teórica	16
2.1 Introducción	16
2.2 Nuestra fuente de energía “el Sol” y su radiación solar	16
2.2.1 Naturaleza de la energía del Sol	16
2.2.2 Geometría del Sol-Tierra, posición del sol	18
2.3 Fundamento teórico del secado	18

2.3.1 Teoría del secado solar	18
2.3.2 Contenido de humedad	20
2.3.3 Curva de secado	21
2.3.4 Curvas de humedad	22
2.3.5 Curvas de humedad de equilibrio (Actividad del agua)	24
2.3.6 Teoría de la difusión del agua	26
2.4 Propiedades psicrométricas del aire húmedo	27
2.5 Evolución del aire en el proceso de secado	30
2.6 Eficiencia del proceso de secado	31
2.7 Secadores rotatorios	32
2.7.1 Tipos de secadores rotatorios	32
2.8 El grano de café (cereza)	36
2.8.1 Características y propiedades físicas de los granos de café	36
2.8.2 Calidad del café	37
2.9 Teoría del sistema de secado rotatorio automático	37
2.9.1 Cámara de secado rotatoria	37
2.9.2 Sistema de calentamiento de aire por tubos al vacío	38
2.9.2 Sistema de calentamiento de aire auxiliar biomásico	38
2.9.3 Instrumentación del sistema de control	39
2.9.4 Sistema de transmisión de engranes y poleas	41
2.9.4.1 Transmisión por engranajes	41
2.9.4.2 Sistemas de poleas con correa	42
2.10 Conclusiones	44
Bibliografía	45
Capítulo 3 Metodología	48
3.1 Introducción	48
3.2 Metodología del SSBRA	48
3.3 Estudiar y considerar parámetros para el diseño del SSBRA	49
3.3.1 Lugar de experimentación	49
3.3.2 Potencial energético	49
3.3.3 Consideraciones del producto	50

3.4. Diseño del SSBRA	50
3.4.1 Cámara de secado del SSBRA	51
3.4.2 Volumen de la cámara de secado	51
3.4.3 Dimensiones y selección de la cámara	51
3.4.4 Aislante térmico	52
3.4.5 Cálculo de la demanda energética para el secado de Café	53
3.4.6 Cálculo de la energía necesaria para secar el producto (Café)	54
3.4.7 Calculo del flujo de aire	54
3.5 Diseño del subsistema de calentamiento por tubos al vacío	55
3.5.1 Cálculo de la superficie del captador solar de aire	55
3.5.2 Tuberías, inyector y extracción de aire	58
3.6 Selección del subsistema de auxiliar de calentamiento biomásico (Leña)	59
3.7 Diseñar subsistema de moto-reductor del secador	59
3.7.1 Motor de 1537 rpm	59
3.7.2 Sistema de poleas y engranes	60
3.8 Diseñar sistema automatizado de control del SSBRA	60
3.9 Construcción y ensamble de todo el SSBRA	62
3.9.1 Construcción y ensamble de los subsistemas del SSBRA	62
3.9.2 Cámara de secado	62
3.9.2.1 Eje transversal y orificios de extracción	63
3.9.2.2 Sistema de elevadores o palas	64
3.9.2.3 Puerta hermética y orificios de extracción de humedad	64
3.9.3 Construcción y ensamble el sistema de calentamiento por tubos al vacío del SSBRA	64
3.9.3.1- Equipo de inyección de aire caliente	65
3.9.3.2 Conexiones y tuberías	67
3.9.4 Construcción del subsistema de calentamiento auxiliar biomásico	68
3.9.5 Construcción del subsistema de transmisión de movimiento del SSBRA	68
3.9.6 Construir y ensamblar el SAC del SSBRA	69
3.10 Metodología de evaluación del SSBRA	70
3.10.1 Funcionamiento del sistema SAC	71
3.10.2 Evaluación del SSBRA	71

3.10.2.1 Evaluación al vacío	72
3.10.2.2 Evaluación con carga	73
3.10.3 Análisis de las evaluaciones	74
3.11 Conclusiones	74
Bibliografía	75
Capítulo 4. Analisis y resultados del SSBRA	78
4.1 Introducción.....	78
4.2 Resultados del estudio y consideración de los parámetros del sistema	78
4.2.1 Demanda energética	79
4.3 Resultados del diseño del dispositivo	79
4.4 Funcionamiento del SSBRA	81
4.4.1 Funcionamiento del suministro de energía térmica del SSBRA	83
4.4.2 Demanda energética eléctrica del SSBRA	83
4.5 Resultados y análisis del proceso de construcción del dispositivo	84
4.6 Análisis de los subsistemas de calentamiento de aire solar – biomásico	88
4.6.1 Análisis del subsistema de calentamiento aire por tubos al vacío A y B	89
4.6.2 Análisis del subsistema de calentamiento térmico auxiliar biomásico	91
4.7 Análisis del sistema completo del SSBRA en vacío	92
4.7.1 Análisis del calentamiento de aire dentro de la cámara de secado	94
4.7.2 Análisis del comportamiento de la humedad en el SSBRA en vacío	95
4.8 Análisis del sistema completo del SSBRA (Con producto)	96
5.1 Conclusiones	101
Productividad	102
Trabajos a futuro	103
Anexos	104

Índice de figuras

Figura	Descripción	Página
Capítulo 1		
1.1.-	Cultivo de café pergamino.....	3
1.2.-	Secador híbrido solar gas natural	5
1.3.-	Vista frontal y lateral del secador solar de tambor para café en cuba en el CIES	5
1.4 -	Secador Cilíndrico horizontal rotatorio a gas.....	6
1.5.-	Secador solar multipropósitos semi-automatizado	7
1.6.-	Secador autónomo híbrido solar-gas LP automatizado	8
Capítulo 2		
2.1.-	Tipos de radiación solar incidentes en la superficie terrestre	17
2.2.-	Proceso de transferencia de calor y masa durante el secado	20
2.3.-	Curvas de secado	22
2.4.-	Curva típica de secado para condiciones de secado constante: (a) Humedad libre en función del tiempo. (b) curva de la velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.....	23
2.5.-	Isoterma de sorción a diferentes temperaturas	25
2.6.-	Curva típica de la variación de humedad de un producto hasta su humedad de equilibrio	26
2.7.-	Carta psicométrica	27
2.8.-	Comportamiento del aire al calentarse	31
2.9.- (A)	Clasificación de los secadores por su modo de operación	32
2.10.- (B)	Clasificación de los secadores según su escala de producción.....	33
2.11.- (A)	Sección transversal de un secador rotatorio, visualización de configuración de las aletas.....	34

2.12.- (B) Partes de la capa externa del secador rotatorio directo.....	34
2.13.- Secador rotatorio indirecto con tubos de vapor, con transportador para reciclado parcial	35
2.14.- Diagrama de un secador rotatorio	35
2.15.- Esquema de las partes principales que conforman el secador rotatorio de malla (sección transversal)	36
2.16.- Componentes básicos de un sistema de control.....	40
2.17.- Placa de Arduino Mega ADK	41
2.18.- Imagen de transmisión motor, polea y banda	43
2.19.- Imagen de transmisión polea y banda	43

Capítulo 3

3.1.- Metodología empleada para el desarrollo del Secador Solar-Biomásico Rotatorio Automatizado (SSBRA)	48
3.2.- Dimensiones del tubo al vacío	56
3.3.- Diagrama a bloque del sistema automatizado de control	61
3.4.- Diseño del sistema automatizado de control	61
3.5.- Construcción de la cámara de secado, A) la puerta hermética, B) sistema de movimiento interno de los granos y C) eje trasversal de soporte con ranuras para la entrada de aire caliente	63
3.6 – A) Puerta hermética junto con orificios de extracción de aire B) Soporte de la cámara junto a la tubería de entrada de aire	63
3.7 Ilustración de los elevadores investigados	64
3.8 Subsistema de calentamiento de aire solar	65
3.9 Soplador Makita UB1103.....	67
3.10 Subsistema biomásico auxiliar	68
3.11 Subsistema de transmisión movimiento	68
3.12 Modulo micro SD	69
3.13 Pantalla LSD	69
3.14 Teclado matricial	69
3.15. Tarjeta Arduino Mega	69

3.16 Sensor de temperatura (der) y humedad (izq)	69
3.17 Sistema automatizado de control (SAC)	70
3. 18 Flow anemómetro	70
3. 19 Solar power meter	70
3. 20 Estación meteorológica Vantage Pro 2.....	71
3.21 Balanza electrónica para medir humedad. Modelo VE-50-5	73

Capítulo 4

4.1 Diagrama a bloques del sistema automatizado de control	81
4.2 Componentes principales del secador solar biomásico rotatorio automatizado, parte uno: 1) Soplador de aire, 2) Colectores solares A y B, 3) Cámara de secado rotatoria, 4) Subsistema automatizado de control	84
4.3 Componentes principales del secador solar biomásico rotatorio automatizado, parte dos: 4) Cámara de secado rotatoria, 5) Extracción de aire, 6) Subsistema biomásico de respaldo, 7) Tubería y conexiones, 8) Subsistema de transmisión de velocidades	85
4.4 Proceso de construcción de la cámara de secado rotatoria, 1) Encapsulamiento de la cámara rotatoria con metal y recubrimiento de aislamiento térmico, 2) Colocación de la puerta hermética A y B, 3) Colocación de los elevadores y orificios de extracción de humedad, 4) Eje transversal de la cámara de secado con ranuras para la salida de aire caliente, 5) Cámara junto con su tripie de soporte y baleros, eje donde recorre el aire caliente cubierta con una placa de fibra de vidrio	85
4.5 Implementación de los subsistemas de calentamiento de aire: 1) Conexión de la cámara rotatoria junto al subsistema biomásico auxiliar y conexión de tuberías, 2) Introducción de la leña, 3) Subsistema de calentamiento por tubos evacuados al vacío conectados en serie, 4) Soplador de aire maquina	86
4.6 Proceso de construcción y ensamble del sistema de reducción de velocidades, parte trasera: 1) Subsistema de transmisión por engranes y poleas junto al motor de 2HP. 2) Implementación de protección del subsistema de velocidades junto a la caja eléctrica, 3) Implementación del sensor inductivo para el frenado del sistema	87
4.7 Proceso de construcción e implementación del sistema automatizado de control: 1) Diseño del circuito electrónico, 2) Impresión de la placa, 3) Soldadura de los circuitos, 4) Conexión con la Tarjeta Arduino Mega 2560, 5) SAC completo	88

4.8 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 10 de noviembre del 2019	89
4.9 Análisis del comportamiento térmico de la cámara de secado junto al subsistema de calentamiento de aire A y B, embace a la radiación	90
4.10 Análisis del comportamiento térmico de la cámara junto al sistema auxiliar de leña	92
4.11 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 17 de noviembre de 2019	93
4.12 Comportamiento térmico de todo el sistema SSBRA en vacío	94
4.13 Análisis de la temperatura y velocidad del aire a la salida de la cámara de secado	95
4.14 Análisis de la variación de la humedad relativa dentro de la cámara de secado y humedad del ambiente, en vacío	96
4.15 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 31 de marzo del 2019	97
4.16 Variación de las temperatura y humedad en el interior de la cámara de secado, como las temperaturas de los subsistemas térmicos con producto	98
4.17 Variación de la humedad de 275 kg de café e 65 a 12%	99
4.18 Variación de la masa de café de 275 a 120 kg	100

Índice de tablas

Tabla	Descripción	Página
Tabla I.-	Consideraciones de parámetros de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	49
Tabla II.-	Potencial energético solar y biomásico disponible en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	50
Tabla III.-	Características y requerimientos extremos del producto a procesar en el secador rotatorio	50
Tabla IV.-	Características de la cámara de secado interna y externa	52
Tabla V.-	Características de la espuma de poliuretano	53
Tabla VI.-	Características técnicas de los tubos evacuados al vacío	55
Tabla VII.-	Características del motor eléctrico	60
Tabla VIII.-	Características de las poleas, banda y engranes	60
Tabla IX.-	Detalles del segmento del elevador A	64
Tabla X.-	Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café	67
Tabla XI.-	Parámetros para el diseño del SSBRA	80
Tabla XII.-	Tabla de consumo eléctrico de los actuadores del SAC del SSBRA	84

Mi viejo amigo

Café, semilla mágica que guardas un aroma
Que se eleva a los aires cual batir de paloma.
En mis años de infancia platicaba contigo
Sin saber que serías para siempre un amigo
Que más tarde darías pan para mis hijos
Un porvenir seguro y también un abrigo.
Los hombres ignoran en su afán de deleites
Los esfuerzos que implican cuidar tus simientes,
Encaminar tus pasos cual infante inseguro.
Para alcanzar el triunfo al ver tu fruto maduro,
Que suaves manos te cortan para aliviarte del peso
Y más tarde llegar con la ternura de un beso.
Sé, cafeto amigo, que me esperarás por siempre
En umbrosos cafetales de mi tierra querida.
Y estaré contigo, porque tu aroma se mezcla
Con los dulces recuerdos en mi amarga bebida.

Nyrma Lara Anzures



CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1- Introducción

La radiación solar que se recibe en la superficie terrestre puede convertirse en energía calorífica, energía eléctrica o energía mecánica, y/o utilizarse también a través del proceso de la fotosíntesis en las plantas, donde sus residuos se convierten en la energía de la biomasa o bioenergía. Estas energías pueden utilizarse mediante diversas tecnologías, por ejemplo, secado de productos agrícolas, refrigeración de productos perecederos, desalinización de agua y calentamiento de fluidos (agua, aceites, aire, etc.) [1].

El secado de alimentos ha sido utilizado desde la antigüedad, siendo el método más usado donde se expone el producto directamente al sol, pero como se sabe tienen afectaciones climatológicas y biológicas [2].

El secado solar es una rama altamente rentable de la explotación de las fuentes renovables de energía, caracterizada por su alto potencial energético, económico, social y ecológico, contribuyendo a la conservación del medio ambiente al evitar emisiones equivalentes de CO₂, Óxidos de Nitrógeno y azufre, sustituyendo al consumo de electricidad y de combustibles fósiles [3].

Un secador solar es aquel que utiliza la radiación solar para eliminar la humedad de los productos, calentando un fluido y elevando su temperatura, para que éste sea el agente secante que extraiga la humedad del producto a secar [4].

Uno de los principales productos exportables del Estado de Chiapas es el café, es por eso que su secado constituye un proceso de mucho interés. Su secado tiene una importancia decisiva en la obtención de un grano de alta calidad. Al secar el grano de forma correcta, se hace fácilmente conservable, al mismo tiempo que se garantiza su buen gusto y aroma [5], sin perder la calidad de sus propiedades organolépticas.

El principal objetivo del trabajo es diseñar, construir y evaluar un secador solar-biomásico rotatorio automatizado, para el deshidratado de granos de café, cuya tecnología sea amigable con el medio ambiente, mejorando la calidad y productividad en el proceso de deshidratado mediante dos fuentes de energía, una solar por tubos evacuados al vacío y otra biomásico auxiliar mediante combustible leña para el calentamiento de aire.

Este secador debe cumplir con los requisitos necesarios para el secado homogéneo de granos de café, que logre las temperaturas deseadas entre 55 y 60°C y humedades relativas bajas del aire 10 al 12%, para así dar respuesta a la gran demanda que hay de este producto seco en el estado de Chiapas.

1.2- Antecedentes

El café venció distancias, creencias y conciencias. Surgió de los poros de Abisinia, en aquellos campos borrascosos, lejanos, llenos de sol y de sapiencia, fueron los árabes quienes propiciaron su feliz fuga al otro lado del globo; su origen creció con aroma, cuerpo y sabor, así inicia en la provincia de Kafa, su peregrinar el ya codiciado grano de café. Donde se suministraba todo el café que era enviado a Europa. Su proceso de cultivo fue todo un fracaso debido a las semillas secas que sembraban, así fue como el café llegó a América, donde posteriormente se inició la producción de café orgánico. A comienzos del siglo XVIII, desde los jardines botánicos de Ámsterdam viajo a las junglas de Brasil. Fue en 1723, el capitán Francés Gabriel Mathieu, se propuso llevar arbustos a las tibias playas de Martinica, donde llegó con un solo arbusto y se plantó el que sería llamado con mucha razón “oro verde” [6].

Chiapas es un estado con un tradicional cuidado en el cultivo y de buena comercialización. La primera vez que se introdujo el grano de café en Chiapas fue en 1847 por Geronimo Manchinelli, en el municipio de Tuxtla Chico, el café se adaptó rápidamente siendo así el primer grano de café chiapaneco, una muestra del cultivo se aprecia en la (Figura 1.1). Este grano provenía de Guatemala, donde las condiciones climáticas y de producción son parecidas a Chiapas, puesto que en

Centroamérica el café comenzó a producirse desde el siglo XVII cuando fue traído de Francia [7].



Figura 1.1 - Cultivo de café pergamino [6].

El hombre a lo largo de la historia ha sido un científico en el área del secado y conservación de los alimentos. Inicialmente utilizaba la leña para producir calor y la fuerza humana física para obtener algún trabajo, cuando se requería de una fuerza superior a la humana, recurría a animales de carga o a otras fuentes de energía. Él hombre experimentalmente o de forma empírica aprendió de las cualidades de la sal para extraer el agua de los alimentos, principal causante del deterioro de los alimentos, utilizó la energía solar y por último con la llegada de la electricidad se crearon máquinas capaces de hacer casi cualquier cosa, incluso secar los alimentos [8].

Es necesario crear sistemas de almacenamiento de energía solar que sean poco costosos, sencillos, eficientes y duraderos; es posible crear sistemas solares a pequeña escala con aplicaciones concretas y eficientes que ofrezcan una alternativa a las operaciones cotidianas de una comunidad [3].

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar han evolucionado en la historia existiendo dos grandes retos por resolver:

- 1) El costo elevado de los sistemas solares comparado con los costos de los sistemas que utilizan energéticos fósiles.
- 2) El mantenimiento de los sistemas solares.

La energía solar puede ser aprovechada para el calentamiento de agua, secado y conservación de alimentos, secado de materiales, cocción de alimentos, sistemas de refrigeración etc., [3]. Con el paso del tiempo y los desarrollos tecnológicos se han buscado alternativas para la mejora de estos dispositivos.

En algunos trabajos se han adaptado en deshidratadores solares 2 fuentes de energía para garantizar los tiempos de secado, desarrollando así secadores solares híbridos [9].

También ha sido utilizados en sistemas térmico-solares para el proceso de secado de productos, por ser una fuente de energía limpia; sin embargo presenta algunas desventajas: como es el hecho de que sólo puede ser utilizada 8 horas en promedio por día y que depende de las condiciones climatológicas, por la misma razón, se aumenta la temperatura de operación en los secadores solares, ya que de esta manera se reducen los tiempos de secado del producto, en busca de la mayor calidad en el producto en investigaciones se cita la importancia del flujo de aire en el secador [9].

La deshidratación es uno de los métodos más importantes para la preservación de alimentos, muchos procesos de deshidratación se han aplicado para la disminución del contenido de humedad que permite su almacenamiento de manera segura por periodos largos de tiempo, así, el costo de transporte es menor debido a la drástica disminución de la masa y volumen de los productos deshidratados [3].

En 1999 Ballinas presentó el estudio de un secador solar semicilíndrico para granos, presento su diseño y construcción. Experimentó con diferentes sistemas de absorción de energía solar y con diferentes espesores de camadas. Este secador es del tipo estático y fue experimentado para maíz y sorgo húmedos. El tiempo de secado dura aproximadamente 3 días [8].

La empresa Solar Dryers Australia pty 1td, desarrolló un secador híbrido (solar-gas natural) construido con estructura de aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado como se muestra en la (Figura 1.2). Utiliza la energía de la combustión del gas natural para calentar el agua que pasa por radiadores dentro de la cámara y sólo

utiliza la energía solar para calentar el agua por medio de colectores colocados en la parte superior del secador.



Figura 1.2. Secador híbrido solar gas natural [10].

Tiene una capacidad de 10 m^3 , requiere energía eléctrica de 240 V para operar los ventiladores y tiene una cámara de secado de forma rectangular, sin embargo, no presenta información sobre el tiempo de secado, así como del funcionamiento de los dispositivos [10].

En el Centro de Investigaciones de Energía Solar de Cuba (CIES), fue construido el secador solar de tambor rotatorio para granos mostrado en la (Figura 1.3), del cual se realiza el análisis térmico a partir del cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del equipo [4].

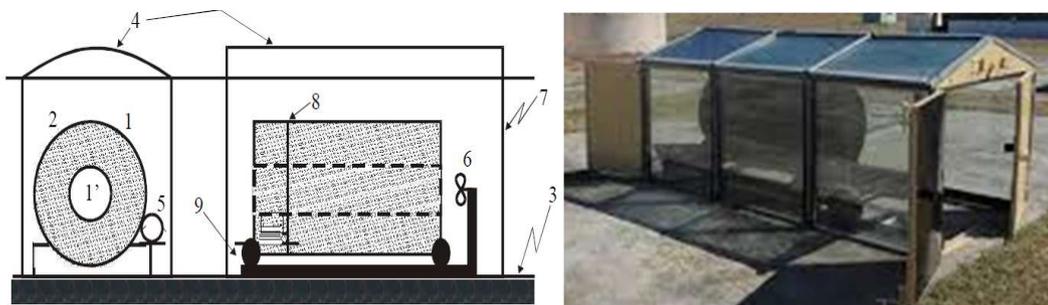


Figura 1.3. Vista frontal y lateral del secador solar de tambor para café en Cuba en el CIES: 1) Cámara interior, 2) Cámara exterior, 3) Plazoleta de hormigón, 4) Cámara con doble cubierta, 5) Motor reductor, 6) Ventilador de recirculación, 7) Cámara con doble cubierta, 8) Tambor, 9) Motor.

Puerta totalmente aislada, 8) Pista de transmisión por fricción 9) Llantas y rieles para la carga o descarga y mantenimiento [4].

Este secador está constituido por una estructura metálica en forma de paralelepípedo, a partir de perfiles angulares soldados entre sí. En el interior de la cámara secado, es colocado un tambor, que está formado por un doble cilindro metálico de chapa de acero perforada, interior (1') y exterior (1). En el espacio anular entre los dos cilindros se coloca el producto para secar. Los extremos se han cerrado mediante soldadura de chapa de acero, lo que permite la rotación de los dos cilindros unidos entre sí como un solo cuerpo. Entre la cámara y el secador pasa aire caliente (2), con un suelo de plazoleta de hormigón (3), la cámara tiene doble cubierta (4), y un puerta totalmente aislada (7), el tambor gira a 6 r/min a través de un mecanismo de motor reductor (5) y un pista para la transmisión por fricción (8), con un ventilador de recirculación (6) pegado a un carro que se desplaza sobre rieles (9) en el sentido longitudinal hacia adentro o fuera de la cámara de secado para las operaciones de carga, descarga o mantenimiento.

Se dispone de un ventilador auxiliar que realiza el tiro forzado del aire desde la cámara hacia el interior del espacio anular (lugar donde se colocan los granos para secar), con el propósito de mantener la uniformidad de las propiedades termo-físicas del aire en la cámara [2].

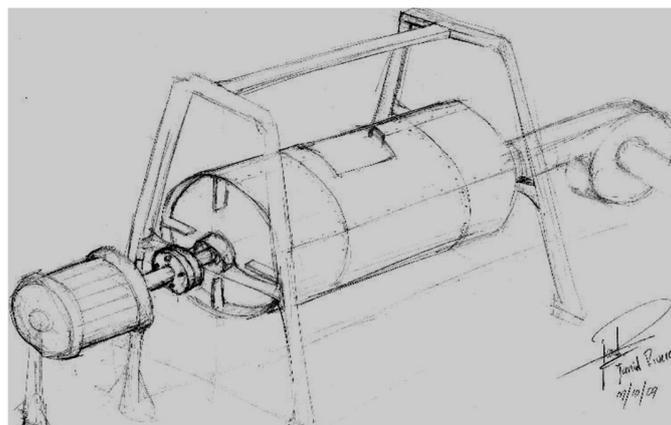


Figura 1.4 - Secador cilíndrico horizontal rotatorio a gas [8].

El secador diseñado de la (Figura 1.4), consta de 5 partes principales: cilindro rotatorio, motor eléctrico, caja reductora, estructura de soporte y quemador a gas. El cilindro está hecho de láminas de acero inoxidable 304 con buena resistencia a la corrosión. El motor eléctrico y la caja reductora se integran en un solo equipo que genera el movimiento del cilindro. La estructura está conformada por perfiles UPN de acero estructural. El quemador es de gas natural y lo mezcla con aire para impulsarlo luego al interior del cilindro [8].

1.2.1- Secadores desarrollados en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER)

En el (IIER) se han hecho estudios de diferentes tipos de secadores solares, también se han diseñado, construido, y evaluados, para diferentes aplicaciones siempre evitando el impacto al ambiente. Como ejemplo se presenta dos de ellos:

- Secador multipropósitos.
- Secador híbrido automatizado solar-gas LP para el secado de Stevia.

Estos secadores, tienen sistemas de control que lo hacen ser semi y automatizados; la energía solar le llega de forma indirecta, que esta no incide directamente en el producto; se diseñan para diferentes tipos de productos agrícolas e industriales.



Figura 1.5 - Secador solar multipropósitos semi-automatizado [11].

Fuente: propia. J. Conde and J. Moreira, 2015, Study of Drying of Different Kind of Leaves in a Solar Dryer with Evacuated Tube Air Collectors, IMRC2015.

Este es un secador solar es multipropósitos en la (Figura 1.5), consiste en una cámara de secado de paneles multi-muro, con un sistema de calentamiento de aire de placa ennegrecida y por colectores de tubos de vacío, un sistema de circulación de aire consistente en un soplador, un extractor de aire húmedo y ventiladores que impulsan el aire caliente desde el colector hacia la cámara de secado. El consumo de energía de los ventiladores es mínimo, sin embargo, se utiliza un soplador para hacer pasar el aire a través de los tubos al vacío el cual tiene un consumo energético muy alto. Este deshidratador está semi-automatizado para monitoreo del producto y de sus parámetros físicos como temperatura y humedad, además de tener un control de temperatura.



Figura 1.6 Secador autónomo híbrido solar-gas LP automatizado [12].

Fuente propia. Oscar A. Conde Días, DR. Joel Moreira Acosta y DR. Jorge E. Conde D. Desarrollo de un Sistema Automatizado de Control para un Secador Autónomo Híbrido Solar-Gas LP, en el Municipio de Santa María-Huatulco. Tesis. Diciembre 2017.

También en el IIIER, fué desarrollado un secador híbrido solar-gas LP para el secado Stevia totalmente automatizado como se observa en la (Figura 1.6).

Este secador solar cuenta con una cámara de secado de paneles multi-muro de 30 m^3 , 2 sistemas de calentamiento de agua (calentador de agua por tubos al vacío y gas LP a través de un boiler de paso), sistema de calentamiento de aire por tubos al vacío de 42 tubos evacuados al vacío llamado “mariposa”, 4 intercambiadores de calor (radiadores), 2 bombas de recirculación agua, sistema de adquisición de datos y sistema automatizado y control [12].

1.3- Problemática

Chiapas es el principal estado productor de café arábica en México y su secado se efectúa en traspatio, ósea, este grano es secado en plazoletas de concreto expuestas directamente al sol, al peligro de contaminación por polvo y agentes biológicos. Este método de secado no le aporta una buena calidad final, además se tiene que estar en constante remoción para poder homogenizar su secado, así, este grano se debe evitar que se pudra ya que se inician cambios en su composición química que afectan las cualidades y propiedades organolépticas (aroma, sabor, acidez y cuerpo, etc.), y es por ello que llega a tener pérdidas de hasta un 40 %, por mala calidad o muerte del grano, ya sea por golpes, quebraduras, exposición a temperaturas elevadas o afectaciones climáticas.

Existen diferentes tipos de dispositivos de secadores solares rotatorios, que tienen diversas aplicaciones y que son altamente costosos, ya que sus fuentes de energías son de fuentes convencionales como de resistencia eléctrica o combustible fósil para abastecer la gran demanda energética que necesitan.

La complejidad de los fenómenos combinados de transferencia de calor y materia que ocurren en su interior hacen que la operación y control de un secador rotatorio sea un gran desafío. Por ello es necesario tenerlo en constante movimiento para tener un secado homogéneo de los granos, controlar la temperatura entre 55 °C y 60 °C, para mantener su calidad y disminuir el tiempo de secado.

1.4- Objetivo e hipótesis

1.4.1- Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un secador solar-biomásico rotatorio automatizado, para el deshidratado de granos de café, cuya tecnología sea amigable con el medio ambiente, mejorando la calidad y productividad en el proceso de deshidratado del mismo.

1.4.2- Objetivos particulares

1. Consideración de los parámetros del sistema.
 - Lugar de experimentación.
 - Potencial energético.
 - Consideraciones del producto.
2. Diseñar el secador solar-biomásico rotatorio automatizado.
 - Diseñar cámara de secado rotatoria del secador.
 - Diseñar el sistema de calentamiento de aire mediante tubos al vacío del secador.
 - Diseñar sistema de moto-reductor del secador.
 - Diseñar sistema de control automatizado del secador.
3. Construir el secador solar-biomásico rotatorio automatizado del acuerdo al diseño propuesto.
 - Construir y ensamblar cámara rotatoria interior y exterior del secador.
 - Construir y ensamblar el sistema de calentamiento por tubos al vacío del secador.
 - Ensamblar y adaptar el sistema de calentamiento biomásico del secador.

- Construir y ensamblar el sistema de moto-reductor del secador.
 - Construir y ensamblar el sistema automatizado de control del secador.
4. Evaluar y analizar el comportamiento del secador solar-biomásico rotatorio automatizado.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de control y de sus actuadores, que medirán y registrarán las variables de humedad y temperatura del secador solar biomásico rotatorio automatizado.
 - Evaluar termodinámicamente el secador solar biomásico rotatorio automatizado en vacío.
 - Evaluar termodinámicamente el secador solar biomásico rotatorio automatizado con carga.
 - Analizar los resultados de las dos evaluaciones anteriores del secador solar biomásico rotatorio automatizado.

1.4.3- Hipótesis

Con el desarrollo del secador solar biomásico, rotatorio y automatizado, se pretende disminuir las pérdidas del secado tradicional del grano de café, deshidratándolo en menor tiempo y evitando las afectaciones bioclimáticas como la contaminación biológica.

1.5- Justificación

Como se sabe Chiapas es el principal estado productor de café arábica en México, y como también sabemos, México es uno de los países más importantes a nivel mundial en la exportación de este aromático producto.

Hoy en día el cultivo de diferentes productos agropecuarios en nuestro país y específicamente en el sur sur-este del mismo, tiene muchas pérdidas económicas debido a pérdidas de cosecha y de productos por no tener diversas formas de conservarlos. Estas pérdidas anuales son excesivas, alcanzando vender un máximo por productor de un 50 % de su cosecha, lo demás se deteriora o no se recolecta, debido a plagas royal y broca [13].

Además, en el sistema de secado tradicional no se pueden controlar las variables o parámetros del proceso, todo lo anterior tiene impacto con la calidad del grano y su valor comercial, aunque es el método más difundido en países en vías de desarrollo y el más económico, ya que la energía solar es gratuita [14], más sin embargo es necesario mantener la calidad del grano, ya que si no se le da el secado correspondiente, tiende a perder sus propiedades organolépticas (sabor , olor, textura, etc) y ya no es posible su venta o exportación.

Y para resolver dichos problemas se ha propuesto una nueva tecnología para el secado del grano de café, desarrollando un secador solar-biomásico rotatorio totalmente automatizado, donde la energía que calentará el fluido (aire), se obtendrá de un subsistema híbrido solar-biomásico. Este sistema consiste en dos sistemas de calentamiento de aire, el primero es una cámara de combustión ahorradora de leña y el segundo un sistema de calentamiento solar por tubos al vacío, para poder obtener un secado homogéneo en los granos de café, y es por eso que se propone un sistema novedoso energético en la región para el secado mediante el calentamiento del aire.

1.6- Conclusión

Las investigaciones realizadas se enfocan principalmente en el diseño para garantizar condiciones estables de trabajo en el secador rotatorio, variando un poco su geometría, posición de sensores dentro del secador y automatizándola totalmente en base a tiempos, también se enfoca en su fuente de energía auxiliar de combustión leña, que permitirá mantener el suministro de energía constante de día y por las noches, y de esta manera tener un flujo de aire caliente uniforme teniendo como resultado un secado homogéneo de los granos de café.

Es importante mencionar que en la actualidad no existe ningún dispositivo solar-biomásico rotatorio automatizado, por lo cual el área de trabajo de estos opera con grandes volúmenes de producto y energía, y para el desarrollo de estos tipos de dispositivos es muy amplio además de que en la mayor parte del país se cuenta con potencial energético disponible.

Bibliografía

- [1] IILSEN, 2014, Nuevas Energías Renovables: Una Alternativa Energética Sustentable para México (análisis y propuesta)., pag.9.
http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf
- [2] Fonseca F. S., Abdala Rodríguez J. L., Pantoja E. J, Torres T. A. 2000. Análisis Térmico del Secador Solar de Tambor Rotatorio para Granos. Revista Tecnología Química Vol. XX, No. 3. Pp 21-24.
- [3] Bergues R. C. C., Bèrriz P. L. y Griñà V. P. Generalización de Secadores Solares Directos en Cuba. Análisis Numérico de sus Tendencias Actuales de los Desarrollos Locales Sostenibles. Vol. 3, N.º 8.
- [4] Iglesias D. R., Pantoja E. J., Moreira A. J., Farrera N. y Ibáñez D. G. 2011. Diseño de un Secador Solar con Circulación Forzada. LACANDONIA, Vol., 5, no.1: 79-88.
- [5] Ferro F. V. F., Fonseca F. S., Abdala R. J. L., Torres T. A., Pantoja E. J., Ciro B. R, Griñà V. P. y Ibáñez D. G. 1999. Análisis de Opciones para el Secado Solar de Café. Parte 1. Aspectos Cinéticos. Revista Tecnología Química Vol. XIX, No. 3.
- [6] Nyrma L. A., (2015). *Soledad en los cafetales*, Tuxtla Gutiérrez Chiapas, Consejo Estatal para las Culturas y Artes de Chiapas, (Coneculta).
- [7] Historia del Café en Chiapas. Historia Del Café En Chiapas, Sus Origenes En El Soconusco. [Online]. Available: <http://mycoffeebox.com/historia-del-cafe-en-chiapas-sus-origenes-en-el-soconusco/>. [Accesed: 12 – Septiembre - 2018].
- [8] Fausto Carpintero y Jiménez C. Vidal. Diseño De Un Sistema De Secado De Café. Tesis, 2009.
- [9] Guadalupe Pavón Gómez y Joel Pantoja Enríquez, Sistema Híbrido Termo-Solar Eólico para la Conservación de Productos Agropecuarios, Tesis, febrero 2015.
- [10] Solar Dryers Australia Pty Ltd (2007), Secador híbrido. Obtenida el 07 de diciembre de 2016, [http:// www.rosegum.com.au/10m.htm](http://www.rosegum.com.au/10m.htm).
- [11] J. Conde and J. Moreira, 2015, Study of Drying of Different Kind of Leaves in a Solar Dryer with Evacuated Tube Air Collectors, IMRC2015.
- [12] Oscar A. Conde Días, DR. Joel Moreira Acosta y DR. Jorge E. Conde D. Desarrollo de un Sistema Automatizado de Control para un Secador Autónomo Híbrido Solar-Gas LP, en el Municipio de Santa María-Huatulco. Tesis. Diciembre 2017.
- [13] Cosecha de café, con 50% de pérdidas, 17 de septiembre 2020.
<https://www.cuartopoder.mx/chiapas/cosecha-de-cafe-con-50-de-perdidas/317102/>.
- [14] Fonseca F. S., Abdala Rodríguez J. L., Ferro F. V. R., Pantoja E. J, Torres Y. A. 2003. Estudio Comparativo Del Secado Solar De Café En Plazoletas Tradicionales Y Ennegrecidas. Tecnología Química Vol. XXIII, No. 3.

El amor, es la fuente de energía más poderosa de todo el mundo, por qué no tiene límites.

Albert Einstein

**Entiendo que no todo puede ser azul, ni rojo, amarillo o verde,
que todo tiende a cambiar de color,
de acuerdo a la vida como la veas o la vives,
como lo hace un girasol,
en espera de la energía blanca de la estrella del sol,
esperando absorber los fotones para poder sobrevivir otro día,
ya sea el mejor momento de su vida, el día hoy.**

O. Conde D.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Introducción

En este capítulo se estudia la teoría que ayude a dar cumplimiento del objetivo principal. Se analizarán los conceptos relacionados con la teoría de secado y los secadores de tipo rotatorios y así conocer sus características; revisar las clasificaciones, la relación de sus diseños con el trabajo que realizan y el tiempo de secado junto a parámetros involucrados en el proceso de secado con aire caliente y su relación entre ellos, y que actualmente son empleados para tal fin. Por otro lado, se involucra la teoría de los granos de café, la cámara rotatoria, los sistemas de calentamiento de aire, sistema de transmisión e instrumentación, para fines de un control automatizado y así justificar la selección que se hizo del diseño.

También se analiza la fuente de energía (el Sol) y la medición de esta energía que radia para poder comprender las características fundamentales, su dispersión, su intermitencia sobre la radiación incidente en la Tierra, el lugar donde será ubicado y así tener un mayor aprovechamiento de esta energía.

2.2 Fuente de energía “el Sol” y su radiación solar

2.2.1 Naturaleza de la energía del Sol

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de $1.39 \text{ m} \times 10^9 \text{ m}$ y está a una distancia promedio de $(1.5 \text{ m} \times 10^{11} \text{ m})$ de la tierra, tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K [1], está constituido por un 70 % de H^2 , es un enorme reactor nuclear que irradia continuamente una potencia de $3,8 \cdot 10^{23} \text{ kW}$. De esta cantidad, la Tierra intercepta $1,7 \cdot 10^{14} \text{ kW}$, siendo el 30 % de la radiación recibida reflejada al espacio, el 47 % es absorbida para mantener la temperatura ambiente y el 23 % restante, es utilizado para mantener la convección atmosférica y el ciclo hidrológico [2].

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol a la Tierra [1]. El término radiación solar, tiene dos definiciones que son común en la práctica, para referirse a la potencia o a la energía entregada por el Sol [2].

- **Irradiancia G (potencia de la radiación):** es la energía incidente sobre una superficie por unidad de tiempo y de área (W/m^2).
- **Irradiación H (energía de la radiación):** es la energía incidente sobre una superficie por unidad de área, durante un determinado periodo de tiempo, (J/m^2).

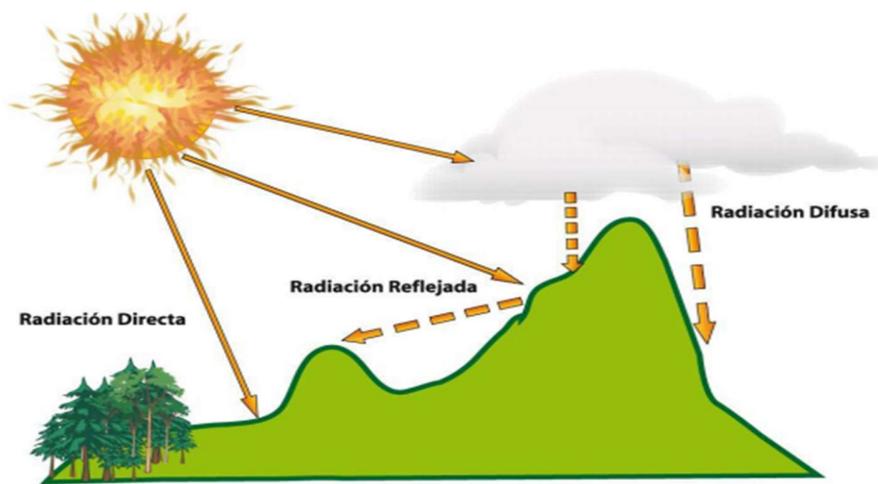


Figura 2.1 Tipos de radiación solar incidentes en la superficie terrestre [3].

Como consecuencia de las diferentes regiones y composición de la atmósfera, no toda la energía solar alcanza la superficie de la Tierra [1]. La radiación total es la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada que se reciben sobre una superficie, esto se puede ver en la Figura de arriba.

Los cálculos y las ecuaciones de la radiación solar, su radiación normal extraterrestre, además de la energía total en el espectro solar (la constante solar) [1,3], se muestran en valores obtenidos por el World Radiation Center [2], también se muestra la ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre a lo largo del año [1,3], parte de los cálculos realizados para determinar la potencia, la energía solar y su distribución espectral de la radiación solar.

2.2.2 Geometría del Sol-Tierra, posición del sol

La Tierra, al igual que el resto de los planetas y de acuerdo con la primera ley de Kepler, gira en torno al Sol, describiendo una órbita elíptica con dicho astro situado en uno de sus focos [3]. La distancia media de la Tierra al Sol, r_0 , define una unidad de longitud denominada unidad astronómica, UA. Y su valor es:

$$r_0 = 1.495979 \times 10^8 \text{ KM} = 1 \text{ UA}$$

Las ecuaciones fundamentales sobre geometría del sol a la tierra, como su posición solar y movimientos de traslación, rotación, donde muestran la importancia de la distancia y de la energía en que llegan los rayos del sol a la tierra, también se puede ver, en la posición de un observador sobre la superficie terrestre, sus coordenadas geográficas (latitudes (λ , ϕ)) y coordenadas horizontales (acimut (ψ) y la altura solar (α)), declinación solar (δ), y los movimientos aparentes del sol sobre el horizonte, como también las ecuaciones de tiempo solar y oficial, para la predicción de la radiación de cada día del año.

2.3 Fundamento teórico del secado

2.3.1 Teoría del secado solar

El secado es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto a niveles que mantenga una humedad en equilibrio con la humedad relativa del ambiente [3], para el secado de granos de café, el más típico, es el secado a traspatio, el cual consiste en exponer los granos húmedos durante varios días a los rayos directos del sol, sobre una superficie de cemento o madera, donde se elimina agua del producto mediante el sol, el aire circundante y dependiendo de las condiciones climatológicas [4].

En general, los principales objetivos que se suelen perseguir en las operaciones de secado pueden ser los siguientes:

- Facilitar un proceso industrial posterior para la utilización satisfactoria; ya sea de un determinado producto, posibilitar la conservación como (almacenamiento y transporte del material).
- Reducir costos (almacenamiento, transporte, conservación, disminución consumo combustible, etc.).
- Mejorar el rendimiento de una instalación o equipo, y permitir el posterior aprovechamiento de subproductos.

El secado de productos es una técnica altamente desarrollada, que tiene consumos de energía considerables [2], mediante mecanismos que realizan cierta operación los cuales pueden ser:

- Por evaporación o/y vaporización con ayuda de calor (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc).
- Mediante otros procesos físico-químicos (liofilización, ósmosis, adsorción, congelación, etc).
- Por extracción de agua a través de medios mecánicos (presión, vibración, filtrado, centrifugación, etc).

El secado por evaporación térmica, es del que se ocupa este trabajo, es una de las formas más usadas para la deshidratación, en ella existe una mezcla de procesos de transferencia de calor y masa, como se muestra en la (Figura 2.2), la transferencia de calor puede llevarse a cabo por conducción, convección o radiación, y el proceso de transferencia de masa o humedad de la superficie del producto al agente desecante, se realiza por evaporación [3].

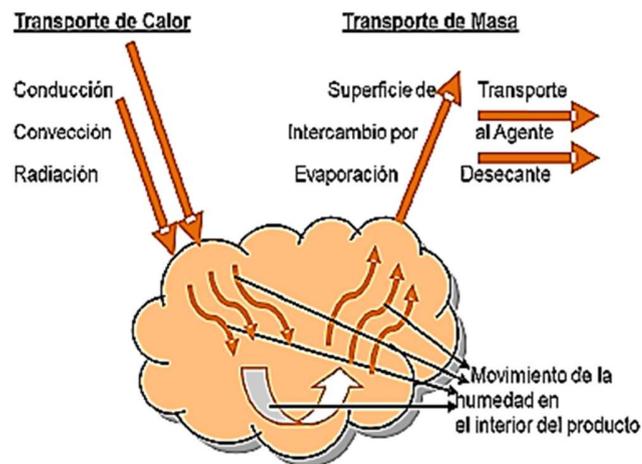


Figura 2.2 Proceso de transferencia de calor y masa durante el secado [3].

El secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al ambiente. La rapidez de este proceso depende de la velocidad del aire, humedad relativa y su temperatura, así como de las características del producto, su composición, su contenido de humedad inicial y su geometría. La cantidad de agua que el aire puede absorber depende en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y puede absorber más humedad [4].

Los consumos energéticos en los procesos de secado son elevados, dicho problema se puede enfrentar en la modificación de las técnicas, como de los procesos de deshidratación actuales, buscando un mayor rendimiento y aumento de su eficiencia, y la utilización de energías alternas; tales como el uso de la biomasa y de la energía solar, que son las que más ventajas ofrecen [3].

2.3.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un producto se puede expresar tanto en base húmeda (Mwb) (kg de agua/ kg de producto húmedo); como en base seca (Mwd) (kg de agua/ kg de producto húmedo); y se definen respectivamente con las ecuaciones 2.1 y 2.2 [3].

Humedad base húmeda (Mwb)

$$Mwb = \frac{Ww}{W0} = \frac{W0-Wd}{W0} \quad (2.1)$$

Humedad base seca (Mwd)

$$Mwd = \frac{Ww}{Wd} = \frac{W0-Wd}{Wd} \quad (2.2)$$

W_0 es el peso inicial del producto húmedo en (kg), W_w es la cantidad de agua en el producto húmedo (kg) y W_d es el peso de la materia seca en el producto (kg) [3].

2.3.3 Curva de secado

Como se expresó en el proceso de secado de un producto, cuando se mide su peso en intervalos fijos de tiempo, se puede trazar una curva de contenido de humedad contra tiempo mostrado en la (Figura 2.3), es una curva muy importante en la cinética de secado.

La curva de secado se puede determinar con la siguiente expresión:

$$DR = \left(\frac{dM}{dt} \right) \quad (2.3)$$

$$DR = \frac{M(t+dt)-M}{dt} \quad (2.4)$$

donde, DR es la curva de secado (kg agua/ kg seco), M es la masa del producto (Kg) y dt es la variación del tiempo.

Los productos agrícolas difieren de otros, porque estos son higroscópicos y el agua está ligada a su estructura de forma que no se pueden secar hasta humedades cercanas a cero, sin embargo en los productos agrícolas, la humedad está generalmente atrapada en capilares donde podemos llegar a ellos y bajar la humedad hasta valores bien bajos pero siempre quedara un contenido de humedad residual [3].

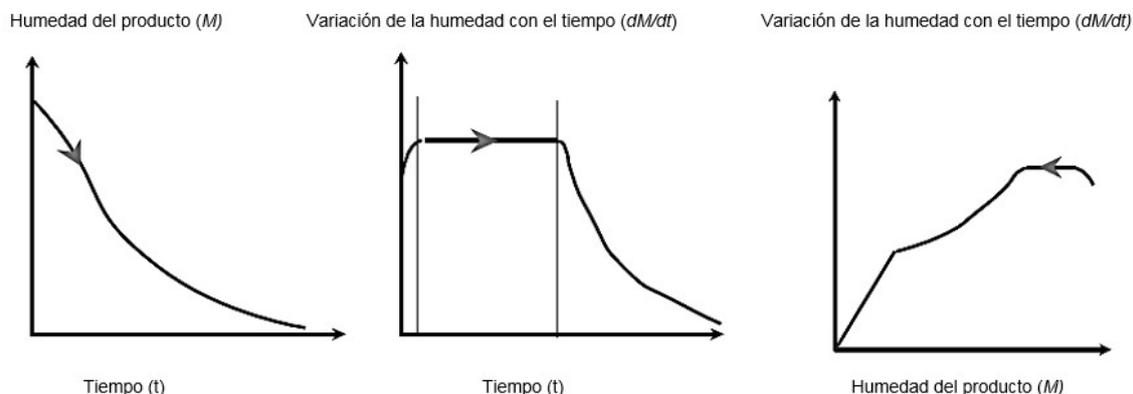


Figura 2.3 Curvas de secado [3].

2.3.4 Curvas de humedad

Estas curvas de humedad ofrecen una información valiosa y está referida al comportamiento en el proceso de secado del contenido de humedad del producto.

Las curvas de humedad, se calculan por la siguiente expresión [3,5]:

$$MR = \frac{Mt - Me}{Mo - Me} \quad (2.5)$$

donde, MR es la curva de humedad (%), Mt es el contenido de humedad en cada instante (kg), Me es el contenido de humedad de equilibrio (kg), y Mo es el contenido de humedad inicial (kg).

Pero como la humedad relativa del ambiente fluctúa mucho, es difícil determinar con exactitud el contenido de humedad de equilibrio, por tanto, se puede expresar este término para cálculos prácticos con la siguiente ecuación.

$$MR = \frac{Mt}{Mo} \quad (2.6)$$

La pérdida de humedad de los productos, obedece a cambios en la velocidad de secado perfectamente definida y que pueden ser clasificados en tres etapas o fases que veremos más adelante en la (Figura 2.4) [3,5].

Este tipo de curvas sirven para determinar el tiempo requerido, para que un determinado producto sufra un descenso esperado en su contenido de humedad, y así mismo poder establecer el gasto energético durante el lapso de tiempo transcurrido [6].

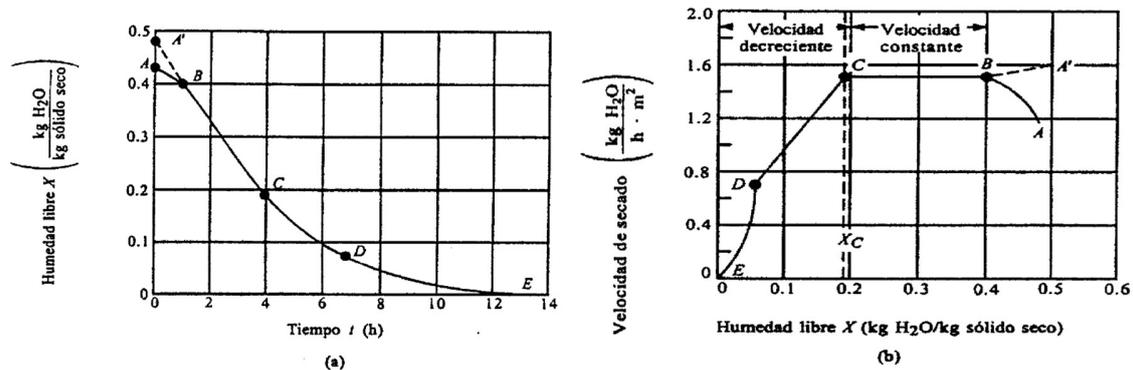


Figura 2.4 Curva típica de secado para condiciones de secado constante: (a) Humedad libre en función del tiempo. (b) curva de la velocidad de secado en función del contenido de humedad libre [6].

La Figura 2.4 (a), es la que se obtiene vía experimental, y la Figura 2.4 (b), se obtiene de la primera, mediante la determinación puntual de las pendientes de esa gráfica.

Estas curvas varían en función del tipo de producto, velocidad, temperatura y humedad relativa del aire, dirección del flujo y espesor de la capa de granos. Algunas veces no se poseen datos experimentales del proceso, y por ello se hace necesario recurrir a modelos teóricos de predicción del secado, estudiados dentro de la cinética de secado de los productos agrícolas, pero que es un contenido que esta fuera del alcance de esta tesis.

Secado durante el período de velocidad constante (B-C)

Se caracteriza porque la superficie del sólido, que está al principio muy mojada y sobre ella, existe una película de agua continua, por lo que la velocidad de evaporación es igual a la de una superficie líquida pura.

Secado durante el periodo de velocidad decreciente (C-D)

El punto C de la Figura 2.4 (b), corresponde al contenido crítico de humedad libre X_c . En este punto no hay suficiente de agua en la superficie, para mantener una película continua; La superficie, ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir hasta que la misma queda seca en su totalidad en el punto D [6].

2.3.5 Curvas de humedad de equilibrio (Actividad del agua)

La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio a_w . Están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y su humedad. Así, un producto tiene una presión de vapor características para cada temperatura y humedad contenida. Esto determina si el material adsorberá o emitirá humedad en su exposición del aire.

El concepto de actividad de agua en un material, permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él. Así, un producto intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta que se establece una situación de equilibrio. De forma, que la humedad relativa de equilibrio del aire, en contacto con el agua libre es del 100 % y, por lo tanto, su actividad es 1 [3].

Las isotermas de sorción aportan información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse a fin de conseguir un proceso adecuado para la conservación y almacenamiento de los productos, además, permiten conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada, esto se puede ver en la Figura 2.5.

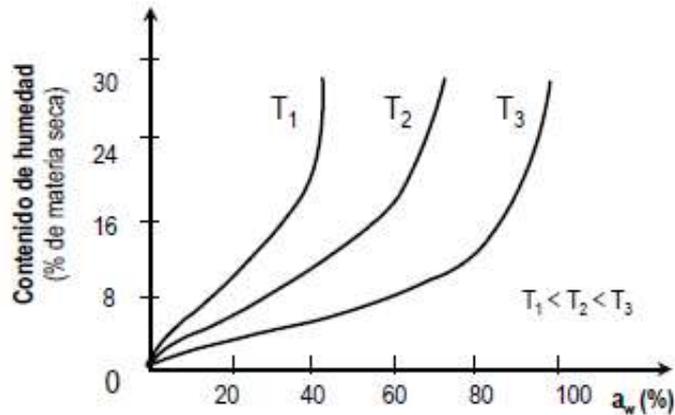


Figura 2.5 Isotherma de sorción a diferentes temperaturas [3].

La humedad de equilibrio de un material higroscópico es aquella que presentará el mismo después de estar expuesto a un ambiente con condiciones especiales o particulares en un tiempo suficientemente largo. Para un valor determinado de temperatura podemos encontrar, que para cada producto, hay una relación entre la actividad del agua y la humedad de equilibrio de éste, a esta relación se le llama isoterma de sorción del material mostradas en la Figura 2.6 [3,7].

La casi totalidad de los alimentos son higroscópicos, por ello tienden a retener humedad en su estructura celular interna. Es importante conocer las condiciones de humedad de equilibrio para así determinar las condiciones de almacenamiento.

Las curvas de humedad de equilibrio son muy específicas para cada producto, además dependen de las condiciones de almacenamiento. En la figura 2.6, se ilustra un caso genérico del secado de un producto, como se puede apreciar la humedad del producto, como va disminuyendo hasta valores entre el (10 y 12%) y tiende a mantenerse constante, entonces podemos decir se ha llegado a su humedad de equilibrio [3].

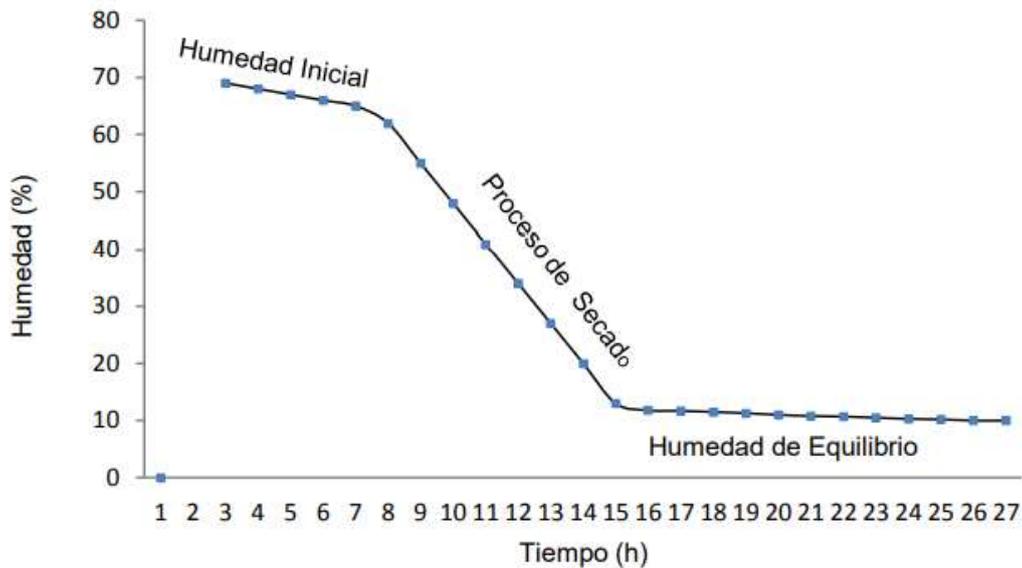


Figura 2.6 Curva típica de la variación de humedad de un producto hasta su humedad de equilibrio [3].

2.3.6 Teoría de la difusión del agua

El principal mecanismo en el secado es la difusión del agua [3,8]. La difusión se da en sólidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos de vapor; el vapor se difunde hacia afuera hasta alcanzar la superficie por donde pasa corriente de aire seco, pero se sabe que esta teoría no tiene en cuenta el encogimiento o casos de endurecimiento [3,9].

La solución de la Ley de Fick para diferentes geometrías, como la de las configuraciones de cilindro que son las geometrías que más se adaptan a la del grano de café (granos), relacionada con la siguiente ecuación:

Cilindro:
$$\Gamma = \frac{X-X_s}{X_0-X_s} = \frac{4}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} 1 e^{(-\beta_n^2 Def)} \quad (2.7)$$

donde X_0 es el contenido de humedad inicial; X_s es el contenido de humedad en la superficie; L es el espesor de la lámina; r es el radio del cilindro; β_n son las raíces

de la función Bessel de primera clase y de orden cero, Def es el coeficiente de difusión efectiva.

2.4 Propiedades psicrométricas del aire húmedo

Los procesos de secado dependen en gran medida de los cambios que se producen en las propiedades del agente desecante, a continuación se presentan las ecuaciones que permiten determinar las principales variables psicrométricas en un rango amplio de temperaturas (de -40°C a 110°C), a partir generalmente aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), cuya información se encuentra organizada en las conocidas cartas psicrométricas en la (Figura 2.7), y para entender las variaciones de las características del aire en el proceso de secado, es necesario conocer la forma de determinar las variables psicrométricas [3].

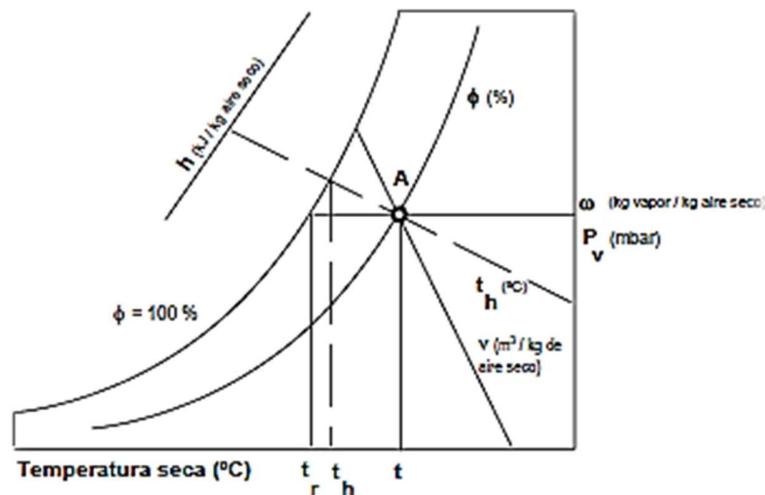


Figura 2.7 Carta psicrométrica [3].

La necesidad térmica para secar un producto es (Lt), que es el calor latente de vaporización de agua en (J/kg), representa la cantidad de energía que debe absorber el producto para evaporar su humedad, o sea la energía necesaria para el

cambio de fase, para el agua libre es de alrededor de 2450 kJ/kg a 20 °C, su valor en función de la temperatura puede determinarse en la ecuación siguiente por:

$$L_t = \frac{R}{M} [(P_{s1} - P_{s2T})] \quad (2.8)$$

donde, R es la constante universal de los gases ($8314 \text{ J / (kmol}\cdot\text{K)}$); M_w es el peso molecular del agua (18.01 kg / kmol); $P_{s1} - P_{s2}$ son las constantes de la ecuación con valores 6547.01 y 4.23 respectivamente y T la temperatura absoluta (K).

En los productos el agua no está libre, por tanto, es más difícil extraerla por lo que el calor latente de vaporización es mayor y dependerá del tipo de producto, su humedad y temperatura. Por otro lado, si la humedad relativa del ambiente es mayor que la actividad del agua que le corresponde a su contenido de humedad, este absorbe humedad, por tanto, no basta suministrar calor al material, sino que tener una humedad relativa del ambiente lo más baja posible, por eso es necesario precalentar el aire para secar [3].

Según los principios de la termodinámica, las ecuaciones que se utilizan para la determinación de las diferentes propiedades psicrométricas se basan, en general, en la aproximación de considerar al aire húmedo como gas ideal [3], que tiene las siguientes propiedades:

Presión Total: (de aire seco y vapor de agua). Es la suma de las presiones parciales de sus componentes (aire y vapor de agua), en condiciones normales la presión absoluta es de 101.325 KPa (1 atm), las presiones parciales de sus componentes se determinan por la ecuación de estado para gases ideales.

$$P_t = P_{as} + P_v \quad (2.8)$$

Ecuación de los gases ideales.

$$PV = MRT$$

Es la presión parcial del aire seco.

$$P_{as}V = \left(\frac{mas/Mas}{RT} \right)$$

Es la presión parcial del vapor de agua.

$$P_vV = \left(\frac{mv/Mv}{RT} \right)$$

donde (m_a y m_v) son las masas de aire seco y de vapor de agua en (kg), y (M_a y M_v) el peso molar o masa molar del aire seco y del vapor de agua (g/mol).

Presión de saturación: la presión en la línea de saturación del aire.

$$P_{vs} = 610.78 * e^{17.269 * T_s / 273.3 + T_s} \quad (2.9)$$

Humedad absoluta: Es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco.

$$W = m_v * m_a \text{ en función de la presión } w = 0.69128 [P / (P_t - P_v)] \quad (2.10)$$

Humedad Relativa: Es la relación entre la presión parcial de agua en la mezcla a una temperatura dada (P_v) y la presión de saturación a la misma temperatura (P_{vs}).

$$H = (P_v / P_{vs}) * 100 \% \quad (2.11)$$

Temperatura de rocío: Si se mantiene constante la presión parcial de vapor de agua llega a una temperatura en que se produce la saturación del vapor de agua y ese vapor de agua se puede condensar, siendo esa es la temperatura de rocío.

Definiendo el parámetro B , es posible obtener la temperatura de rocío (T_{pr}).

$$B = L / (P_v + 1000)$$

$$T_{pr} = 6.54 + 14.526 * B + 0.7389 * B^2 + 0.4569 * B^3 + 0.1984 * P_v \quad (2.12)$$

Para 0 - 93 °C

Entalpía: Propiedad relacionada con la segunda ley de la termodinámica y relaciona la energía interna (u) y el producto pv :

$$h = u + pv \text{ (kJ/kg)} \quad (2.13)$$

para el aire seco es: $h_{as} = C_{pas} * T_s = 1.006 * T_s$

C_{pas} es el calor específico a presión constante del aire seco.

$$\text{para el vapor de agua es: } h_v = C_f + C_{pv} * T_s = 2501 + 1.77 * T_s \quad (2.14)$$

De esta forma la entalpía del aire húmedo puede calcularse por la expresión [].

$$H = 1.006 * T_s + (2501 + 1.77 * T_s) \quad (2.15)$$

Volumen específico: Es el volumen ocupado por el aire húmedo en un volumen de aire seco (m^3/kg).

$$V = V_{mas} = \frac{R T_s M_{as}}{P_{as} - P_v} = 287.05 \frac{T_s}{P_t - P_v} \quad (2.16)$$

2.5 Evolución del aire en el proceso de secado

Como es sabido el aire es el agente secante en casi todos los procesos de secado, el flujo de aire que pasa por el producto además de subirle la temperatura existen procesos de transferencia de masa y energía como se ha explicado, en este proceso crece la humedad relativa del aire bajando la temperatura de bulbo seco y manteniéndose constante la de bulbo húmedo [3].

Precalear el aire constituye una optimización del proceso de secado. Si se analiza una carta psicrométrica, se demuestra que es conveniente precalear el aire. En la (Figura 2.17), se muestran las transformaciones que sufre el aire al ser precalear. Si se considera el aire ambiente no saturado (punto 1) tiene una humedad relativa $H1$, una temperatura $T1$ y temperatura de bulbo húmedo T_{bh1} , entonces tendrá una humedad absoluta $w1$; si el aire no es precalear seguirá la línea de enfriamiento adiabática $Th1$ (línea 1 - 4) y si idealmente el proceso continúa hasta su saturación y le corresponderá la humedad absoluta $w4$, lo que implica que ese aire podrá extraer como máximo una humedad $w4 - w1$. Sin embargo, si antes de usarse en el secado el aire es precalear hasta una temperatura seca $T2$ tendrá una humedad relativa $H2$ (línea 1 - 2), el proceso de secado se correspondería con una nueva línea de enfriamiento adiabática $Th2$ (línea 2 - 3) en

donde las condiciones de saturación corresponden a una humedad absoluta w_3 , en este caso la posibilidad máxima de extraer humedad será igual a $w_3 - w_2$. Se puede apreciar cómo se incrementa sustancialmente la posibilidad de arrastrar humedad del aire cuando este es precalentado.

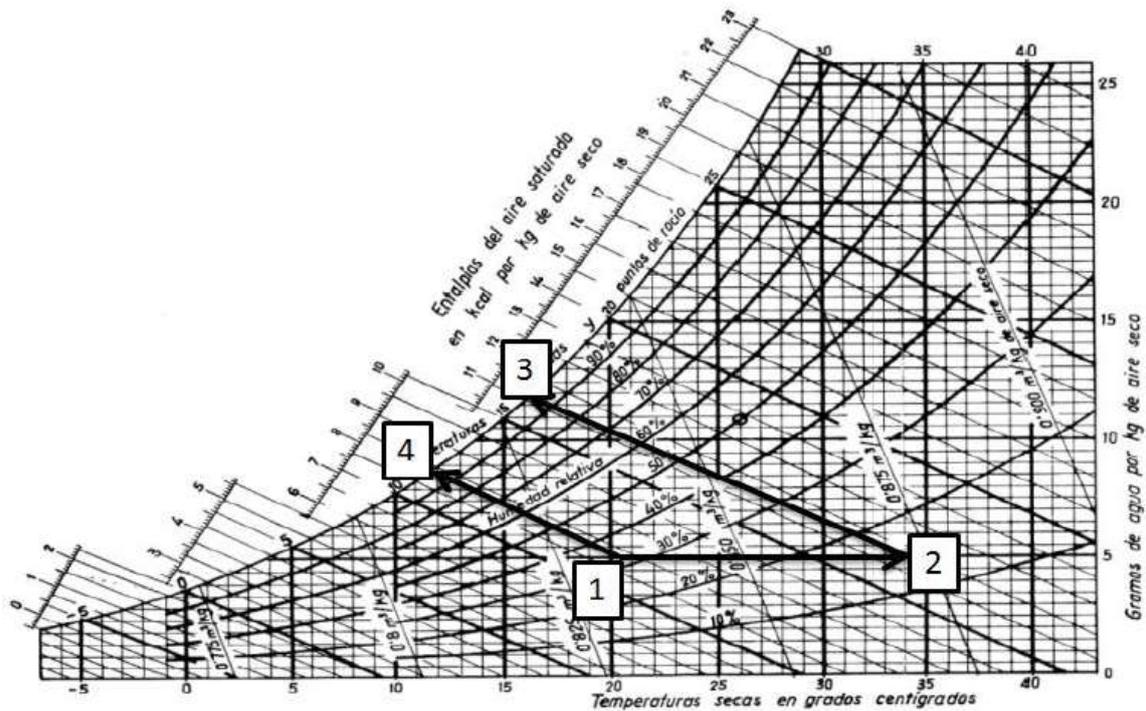


Figura 2.8 Comportamiento del aire al calentarse [3].

2.6 Eficiencia del proceso de secado

Es la relación entre la cantidad de energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso [3]. Para los efectos de calcular este término no se incluye la energía para remover el producto utilizando la ecuación 2.7.

$$Eficiencia = \frac{\text{Kilos de agua evaporada}}{(\text{Área de secado}) (\text{Días de secado})} \quad (2.17)$$

2.7 Secadores rotatorios

Existen diversas categorías en las cuales se puede estudiar los distintos tipos de secadores, a continuación, se da una clasificación general, como también clasificaciones por ciertos criterios a considerarse, enfocándonos en los secadores rotatorios [10].

Los tipos de secadores dependiendo de su modo de operación, se pueden ver clasificados en la Figura 2.9 y por su escala de producción en la Figura 2.10.

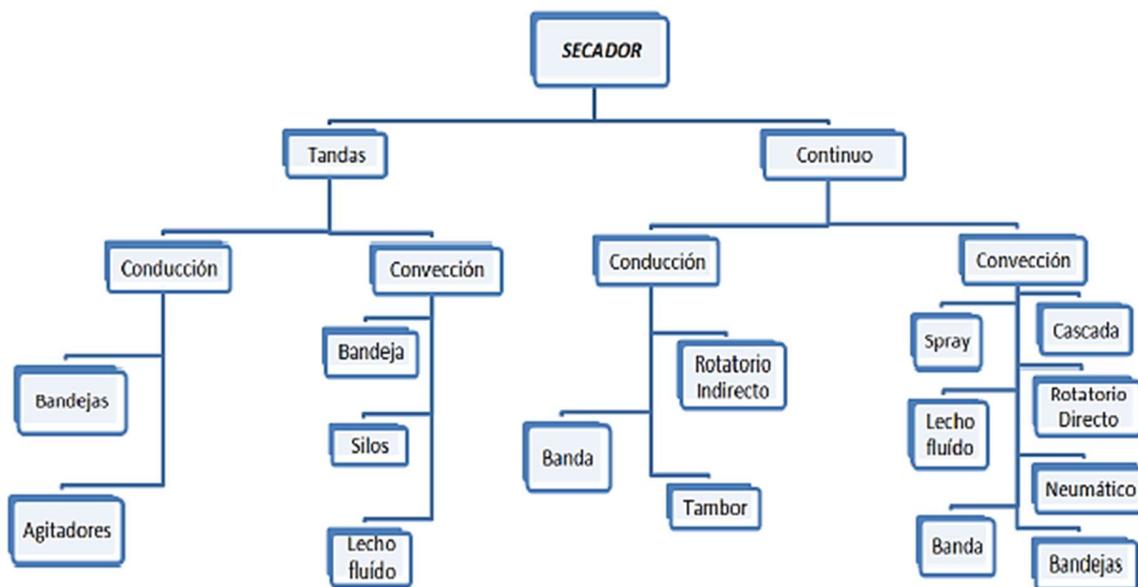


Figura 2.9 Clasificación de los secadores por su modo de operación [10].

El secado rotatorio, se realiza mientras esta en movimiento el producto dentro de un cilindro rotatorio, son usados para materiales que no sean tan frágiles o sensibles al calor, también es uno de los más usados en la industria, siendo efectivos para medianas y grandes escalas de producción.

Consta de una coraza cilíndrica, usualmente construida de plancha de acero, dentro de la cual el material a secar ingresa por un lado y descarga “seco por el otro. También consta de una configuración de aletas que levantan el material para secarlo como cascada. Diversos fabricantes de secadores tienen su propio diseño

patentado de aletas, aunque ya existen diversos gráficos en donde se observan dichas configuraciones [10].

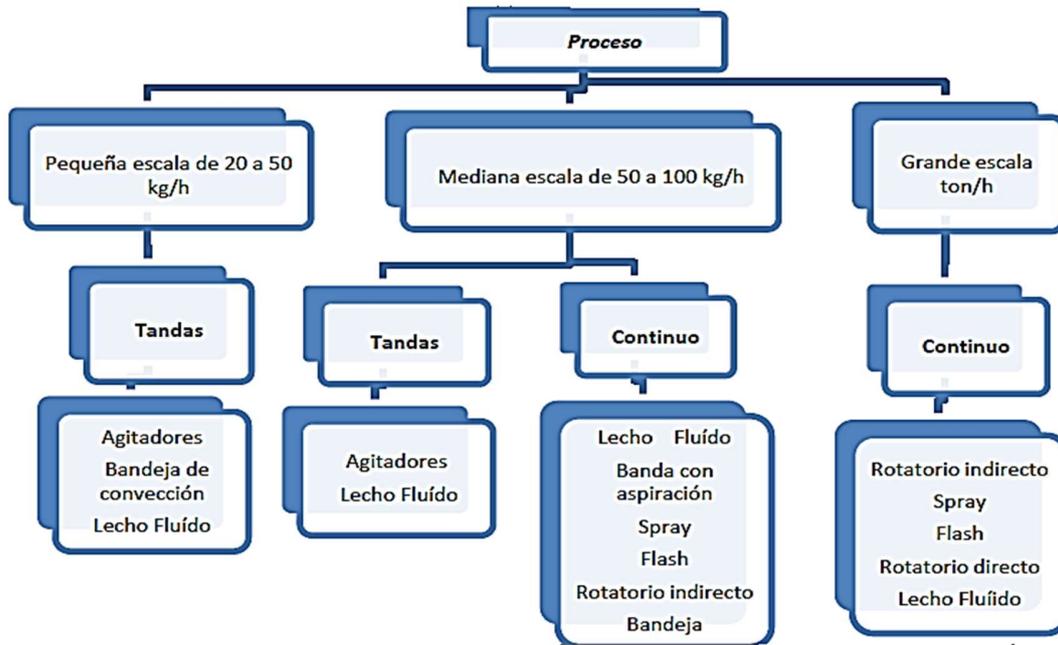
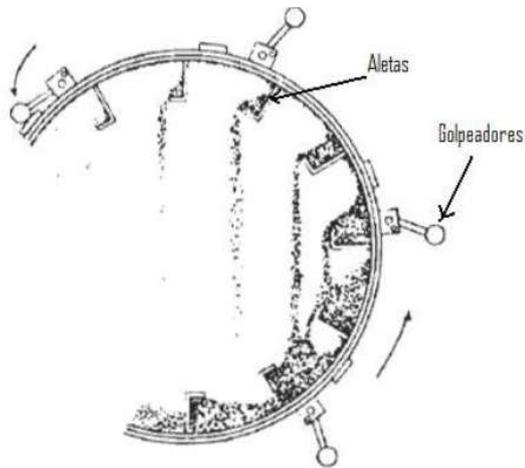


Figura 2.10 (B) Clasificación de los secadores según su escala de producción [10].

2.7.1- Tipos secadores rotatorios

- **Inyección de vapor en tubos:** Los secadores de inyección de vapor en tubos, son más aplicables a materiales sensibles al calor y a contaminación con gases. Una de las aplicaciones comunes está en los productos alimenticios y agrícolas. Existen tubos calentados con vapor y organizados coaxialmente en filas a lo largo del secador. La transferencia de calor se lleva a cabo esencialmente por conducción.

- **Secado de calor Directo:** Los secadores de calor directo, son más aplicables a materiales en formas granulares, comprimidas o de extrusión, que no son sensibles al calor y tampoco son afectados por el contacto directo con gases de combustión. Los materiales pueden ser secados en paralelo o contra la corriente del gas caliente.



Los secadores de flujo paralelo son ideales para el secado rápido, eficiente y a bajas temperatura de materiales que son más sensibles a las altas temperaturas, baja densidad, pegajosos y no adquieren fluidez fácilmente. La transferencia de calor se efectúa predominantemente por convección. se puede ver en la siguiente Figura 2.11 y Figura 2.12 [10].

Figura 2.11 Sección transversal de un secador rotatorio, visualización de configuración de las aletas [10].

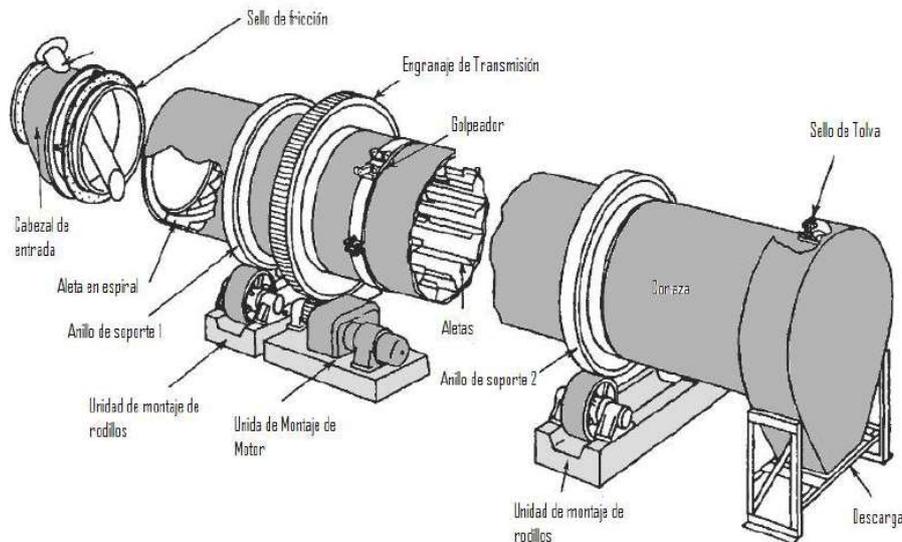


Figura 2.12 Partes de la capa externa del secador rotatorio directo [10].

• **Secado de Calor Indirecto:** Los secadores de calor indirecto son más aplicables a materiales que son sensibles al calor y también son afectados por el contacto directo con gases de combustión, Figura 2.13. En este equipo, el material entra en contacto sólo con la superficie caliente del cilindro, que es calentada externamente con gases de combustión. El material húmedo se introduce en el cilindro rotatorio, insertado en una cámara estacionaria. Los gases de combustión calientes pasan a

través del espacio anular. La transferencia de calor se realiza principalmente por conducción [10].

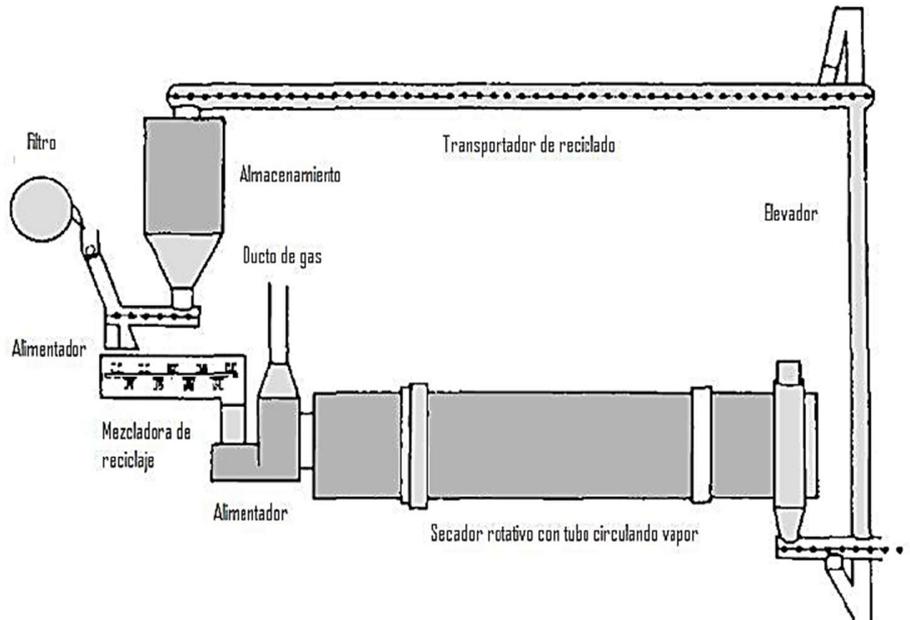


Figura 2.13 Secador rotatorio indirecto con tubos de vapor, con transportador para reciclado parcial [10].

- **Deshidratador rotatorio:** Consisten en una carcasa cilíndrica giratoria, dispuesta horizontalmente o ligeramente inclinada hacia la salida. Al girar la carcasa, se levantan los alimentos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcasa. La alimentación entra por un extremo del cilindro y el producto seco descarga por el otro, se calientan por contacto directo del aire con el alimento [11].

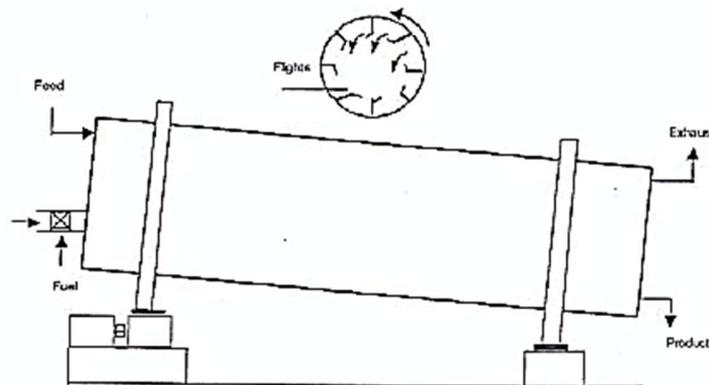


Figura 2.14 Diagrama de un secador rotatorio [11].

- **Secador de malla:** Costa principalmente de una coraza cilíndrica fija, dentro de ella gira una malla de forma tubular donde se encuentra el producto a secar, Figura 2.15. El aire caliente entra a un plenum, para ser deflactado hacia la malla logrando así una mejor distribución de temperatura mayor eficiente de secado [11].

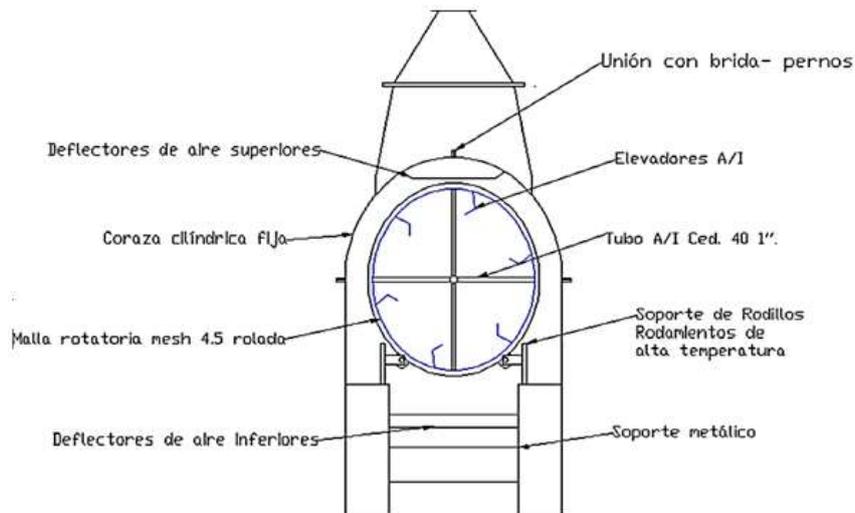


Figura 2.15 Esquema de las partes principales que conforman el secador rotatorio de malla (sección transversal) [11].

2.8 El grano de café (cereza)

2.8.1 Características y propiedades físicas de los granos de café

El nombre científico del grano de café es *Coffea arábica*, se le conoce como cereza, uva o capulín, y está recubierto por una cascarilla muy delgada llamada pergamino, se cultiva en regiones frías con temperaturas de crecimiento entre 13 y 26 °C.

Su contenido de humedad de la cereza del café está entre el 50 % y el 60 % del peso total, dependiendo de sus condiciones. Las cerezas ya secas, se recomienda que tengan una humedad alrededor del 10 al 12 %. Para que el grano pueda ser embodegado, y posteriormente comercializado [12].

El secado de café, es la cuarta etapa del proceso conocido como beneficio húmedo [12], se realiza para evitar la germinación de la semilla, reducir el contenido de

humedad hasta un nivel adecuado para inhibir la formación de hongos y evitar que el grano sufra daño [4].

2.8.2 Calidad del café

El grano, es una semilla viva que debe evitarse que muera, porque al morir se inician cambios en su composición química que afecta las cualidades del producto o propiedades organolépticas, tales como el aroma, sabor, acidez, cuerpo, etc. El grano puede conservarse vivo hasta por 6 años dependiendo del cuidado; un grano vivo tiene un color blanco o amarillo, y se vuelve esponjoso. La muerte del grano puede darse por golpes, quebraduras, fermentación inadecuada, o por exposición a temperaturas elevadas [4].

2.9 Teoría del sistema de secado rotatorio automático

2.9.1 Cámara de secado rotatoria

Como sea visto existen diferentes tipos de cámaras de secado rotatoria, los cuales están hechos de diferentes tipos de materiales y forma en cómo mover los granos [10], los cuales deben ser anti-bacteriales para no afectar a los granos. Así que en donde se protegerá y procesara los granos de café, es una cámara de secado cilíndrica, que es de un material amigable con el producto, su volúmenes interno de $1.5 m^3$ pero como es cónico en la parte superior, se desperdicia una parte, quedando su volumen a $1.1 m^3$ [13], este material es resistente y flexible, resistente a altas temperaturas, cuenta con una tecnología en sus capas, esta tecnología impide la propagación de las bacterias que son las principales causantes de enfermedades, evitando la fotosíntesis de microorganismos dentro del el, protegiéndolos de los rayos *UV*, lo que significa que protege su calidad, siendo amigable con el producto, en este caso sería (el café).

Está cámara esta reforzado a su alrededor con montenes de (0.012 m), recubierto de un aislante térmico de poliuretano, forrado con una placa plástica, conectado mediante valeros a los extremos y sostenido mediante un eje ranurado de (0.050

m) que atraviesa la cámara de secado haciéndola que gire, soportado por un par tripies de tres tubos de (0.076 m) en cada lado.

2.9.2 Sistema de calentamiento de aire por tubos al vacío

Los colectores solares son dispositivos utilizados para coleccionar, absorber y transferir energía solar a un fluido, que pueden ser agua o aire. Los captadores solares de aire abarcan aplicaciones muy variadas, siendo la más destacada a relativa a su utilización en el secado de productos agrícolas y subproductos biomásico, con el objetivo de disminuir el consumo de combustible para la obtención de la energía térmica necesaria para el secado [2].

Estos colectores se componen de un conjunto de tubos de vacío (o evacuados) cada uno de los cuales contienen un colector concéntrico con otro tubo, donde se centra el aire, el cual recoge toda la energía solar absorbida y la transfiere a un fluido portador (calo-portador). Gracias a las propiedades aislantes del vacío, las pérdidas de calor son reducidas y pueden alcanzarse temperaturas en el rango de 77 °C a 100 °C. De esta manera, este tipo de colectores resultan particularmente apropiados para aplicaciones de alta temperatura. Por su forma cilíndrica, aprovechan la radiación de manera más efectiva que los colectores planos, al permitir que los rayos de sol incidan de forma perpendicular sobre los tubos durante la mayor parte del día. Siendo hasta un 30 % más eficientes, teniendo un costo caro, por la unidad de superficie, suelen costar aproximadamente el doble que un colector de placa plana [14; **Error! Marcador no definido.**].

2.9.2 Sistema de calentamiento de aire auxiliar biomásico

En la actualidad se ha diseñado y construido una amplia gama de hornos o estufas que queman biomasa [15]. La combustión directa, es el sistema de extracción de energía más antiguo que existe, el proceso de combustión de materia orgánica (combustible), reacciona químicamente con el oxígeno (comburente) en una reacción que cede calor al medio. El resultado de la reacción es dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y otros elementos como azufre y nitrógeno [16].

El estudio del proceso de combustión que tiene la “leña” para el calentamiento de aire es importante de analizar en el proyecto. Entenderlo permite obtener lineamientos para el diseño de la cámara de combustión y de los ductos de circulación del calor, así como el ducto de evacuación de gases (*humo*), debajo se muestran algunas de las ecuaciones para el proceso de combustión.

MC: es el contenido de humedad de la madera sobre una base húmeda [16].

$$MC = \frac{m_{comb/humedo} - m_{comb/seco}}{m_{comb/humedo}} \quad (2.18)$$

fmc: es el combustible consumido *húmedo* en (*gr*), es la masa de la madera utilizada para llevar el agua a ebullición, se encuentra tomando la diferencia del combustible pesado al inicio de la prueba y la madera que queda al final de la fase de prueba:

$$fcm = fci - fcf \quad (2.19)$$

fcd: es la madera seca equivalente consumida (*gr*), ajusta la cantidad de combustible (*seco o húmedo*) que se quemó teniendo en cuenta dos factores: (1) la energía que se necesita para eliminar la humedad en el combustible y (2) la cantidad de combustible restante no quemado.

$$fcd = comb\ seco - comb\ para\ evap\ agua - comb\ no\ quemado \quad (2.20)$$

Para la evaluación de este sistema de combustión biomásico, se utilizarán protocolos internacionales que se usan para evaluar una estufa de leña mejorada.

2.9.3 Instrumentación del sistema de control

El control de un sistema se efectúa mediante un conjunto de componentes mecánicos, hidráulicos, eléctricos y/o electrónicos que, interconectados, recogen información acerca del funcionamiento, comparan este funcionamiento con datos

previos y, si es necesario, modifican el proceso para alcanzar el resultado deseado [17].

Un sistema es un conjunto de elementos, interrelacionados entre sí, los cuales se caracterizan por poseer unos parámetros inherentes que los definen y por mostrar unas condiciones físicas asociadas, susceptibles de evolucionar con el tiempo, se utilizan dispositivos eléctricos, manuales o automáticos que se emplean para permitir o interrumpir el paso de corriente a los diferentes circuitos de control [17].

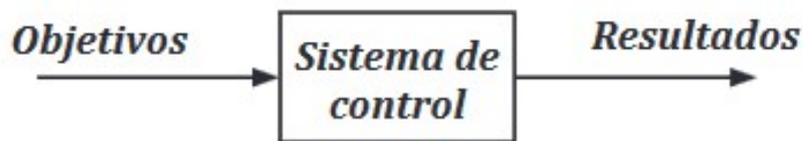


Figura 2.16 Componentes básicos de un sistema de control [17].

Los componentes básicos de un sistema de control pueden ser descritos por:

- a) Objetivos de control.
- b) Componentes del sistema de control.
- c) Resultados o salida.

La relación básica entre estos tres componentes se muestra en la (Figura 2.16), los objetivos de control pueden ser identificados como entradas o señales entrantes, los resultados son considerados como las salidas o las variables controladas; en general, el objetivo del sistema de control es controlar la salida de manera ordenada actuando los elementos de control sobre la señal de entrada [18], todo es controlado mediante una tarjeta de control Arduino, que es un hardware consiste en una placa con un microcontrolador y varios puertos de entradas/salidas, tanto digitales como analógicos, así como salidas *PWM* y de comunicaciones para el control de objetos físicos (*Leds, servos, botones, etc.*), un ejemplo es la tarjeta control Arduino mostrado en la Figura 2.17 [19].



Figura 2.17 Placa de Arduino Mega ADK [19].

La placa se puede controlar directamente desde el ordenador y posteriormente desconectarla para trabajar de forma autónoma, es necesario programarla mediante un software.

2.9.4 Sistema de transmisión de engranes y poleas

2.9.4.1 Transmisión por engranajes

Los engranajes son ruedas dentadas que encajan entre sí, de modo que, unas ruedas transmiten el movimiento circular a las siguientes. El tamaño de los dientes de todos los engranajes debe ser igual. Los engranajes giran de modo que, los más pequeños giran a mayor velocidad, de modo similar al caso del sistema de poleas con correa. En este caso, en lugar de tener en cuenta el diámetro de la polea, se tienen en cuenta el número de dientes de cada rueda [20].

Se puede calcular la velocidad a la que giran los engranajes a partir de los tamaños de las mismas mediante la siguiente ecuación:

$$n_1 \cdot Z_1 = n_2 \cdot Z_2 \quad (2.21)$$

Siendo: n_1 = velocidad del engranaje de entrada, n_2 = velocidad del engranaje de salida, Z_1 = número de dientes del engranaje de entrada, Z_2 = número de dientes del engranaje de salida.

Normalmente al engranaje mayor se le llama rueda y al menor piñón. Al igual que con el sistema de poleas con correa, hay dos tipos de sistemas de transmisión por engranajes [20].

a) Reductor: El piñón es el engranaje motriz y la rueda es el engranaje conducido. En este caso, la velocidad de salida (rueda) es menor que la velocidad de entrada (piñón).

b) Multiplicador: El piñón es el engranaje conducido y la rueda es el engranaje motriz. En este caso, la velocidad de salida (piñón) es mayor que la velocidad de entrada (rueda).



Los engranajes tienen la ventaja de que transmiten movimiento circular entre ejes muy próximos y además transmiten mucha fuerza (porque los dientes no se deslizan entre sí). La relación de transmisión (i) en un sistema de engranajes se puede calcular del siguiente modo:

$$i = Z1 / Z2 \quad (2.22)$$

ò también
$$i = n2 / n1 \quad (2.23)$$

2.9.4.2 Sistemas de poleas con correa

Se trata de dos ruedas situadas a cierta distancia, que giran a la vez por efecto de una correa [20]. Las correas suelen ser cintas de cuero flexibles y resistentes. Según el tamaño de las poleas tenemos dos tipos:

1.- Sistema reductor de velocidad: En este caso, la velocidad de la polea conducida (o de salida) es menor que la velocidad de la polea motriz (o de salida). Esto se debe a que la polea conducida es mayor que la polea motriz.

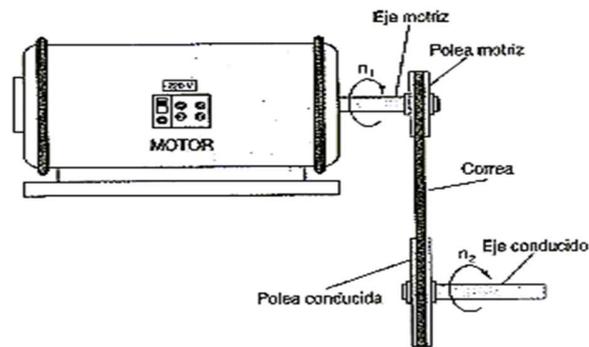


Figura 2.18 Imagen de transmisión motor, polea y banda [20].

Ejemplo de la aplicación de un reductor de velocidades.

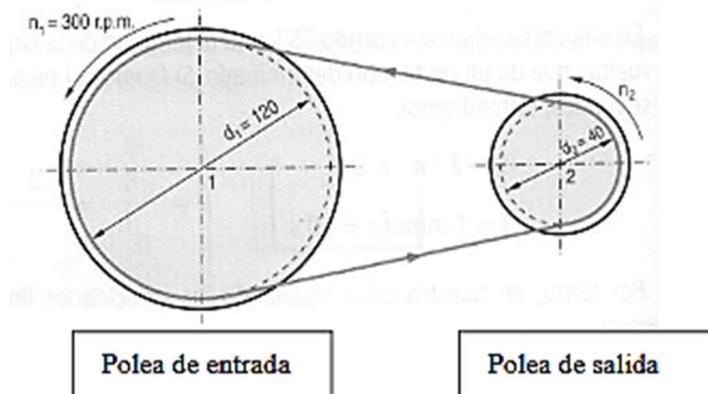


Figura 2.19 Imagen de transmisión polea y banda [20].

2.- Sistema multiplicador de velocidad: En este caso, la velocidad de la polea conducida es mayor que la velocidad de la polea motriz. Esto se debe a que la polea conducida es menor que la polea motriz. La velocidad de las ruedas se mide normalmente en revoluciones por minuto (*rpm*) o vueltas por minuto [20].

Definición: La relación de transmisión (*i*) como la relación que existe entre la velocidad de la polea salida (*n2*) y la velocidad de la polea de entrada (*n1*).

$$i = n_2 / n_1 \tag{2.23}$$

La relación de transmisión, como su nombre indica, es una relación de dos cifras, no una división.

2.10 Conclusiones

En este capítulo se dio a conocer la fundamentación teórica y científica realizando un estudio extenso de la teoría del secado, comprendiendo mejor el comportamiento de la energía solar que incide en una superficie, como la transferencia de calor del sistema de calentamiento por tubos al vacío, su área de captación y su trabajo a temperaturas bajas, también se estudió la transferencia de calor por combustión de leña para calentar el fluido (aire), del sistema del sistema auxiliar biomásico, el comportamiento de transferencia de calor y masa de la cámara de secado para conocer la energía necesaria para mantener la humedad de equilibrio del producto para su almacenamiento. Por otro lado, se estudió el sistema de rotación de la cámara, seleccionando sus elevadores específicamente para mover los granos en forma de cascada sin afectar el grano a 5 revoluciones por minuto, moviéndose mediante un sistema reductor de velocidades, todo ello adaptado a un sistema de control de las variables, para su correcto funcionamiento y hacer de este sistema autónomo.

Bibliografía

- [1] Duffie J. A. and Beckman W.A. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth edition. Editorial John Wiley & Sons, Interscience. EUA. Pp. 3-40.
- [2] Irene M. P. y R. Sebastián R. R.. Modelado y Construcción de un Secador Solar Híbrido de Residuos Biomásicos. Tesis. Noviembre (2005).
- [3] Roilan I. D., Joel P. E. y Guillermo I. D.. Diseño, Construcción, Evaluación y Validación de un Secador Solar para el Secado del Té de Limón. Tesis. Octubre 2013.
- [4] Luis D. R., Julio C. L. y Walter E. V. . Validación del Uso de un Secador Solar de Café Pergamino, en Fincas de Pequeños Productores del Municipio de San Rafael del Norte. Tesis. Septiembre 2009.
- [5] Torres E. y Navarrete J. J, 2004. Congreso Mundial de Energía Renovable México 2004. Instituto de Investigaciones Científicas. Universidad de Guanajuato.
- [6] Restrepo V. A. H. y Burbano J. J. C. 2005. Disponibilidad Térmica Solar y su Aplicación en el Secado de Granos. Scientia et Technica Año XI, No 27, pp. 127-132.
- [7] Mujumdar A. S 2000. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Publicaciones Científicas Inc, Enfield. EUA. Pp 14 -23.
- [8] Van Brakel J. 1980. Mass transfer in convective drying. En Advances in Dry. Editado por A. S. Mujumdar. Hemisphere Publishing. New York.
- [9] Van Arsdel N. B. y Copley M. J. 1963. Food Dehydration. AVI Publishig.
- [10] José S. B., Iván T. C. y Marcelo E. L.. Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano Usando Secador Rotatorio. Tesis. Julio 2009.
- [11] Alejandro B. Z. y Gerardo H. Le B.. Deshidratador de Tomates Utilizando Energía Geotérmica para Ensenada B.C. Tesis. Octubre 2009.
- [12] Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. SAGARPA subsecretaría de agricultura. Fuente: siap 2016. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf
- [13] Tinaco sistema equipado, tri-capa. Rotoplas, más y mejor agua. http://www.corporacionlexus.com/pdf/tanque_rotoplas_hogar.pdf?wmode=transparent.
- [14] Guadalupe P. G. y Joel P. E., Sistema Híbrido Termo-Solar Eólico para la Conservación de Productos Agropecuarios. Tesis. Febrero 2015.
- [15] Edgar S. M.. Diseño y Construcción de una Estufa Ecoeficiente para la Fundación Kyrios. Tesis, marzo 2016.
- [16] Edwin H. E. y Nein F.. Estudio experimental de la estufa ecológica enerchía para mejorar su eficiencia térmica. Tesis. (2017).
- [17] KATSUHIKO OGATA, Ingeniería de Control Moderna, 3ª edición, Pearson Educación; 1998.
- [18] Alí José Carrillo Paz. Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado. 2ª edición. Fondo Editorial UNERMB 2011.
- [19]] Ricardo Marroquín Areola y Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz, Monitoreo en Tiempo Real Inalámbrico de Sistemas Energéticos Renovables, Tesis, marzo 2017.

[20] <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/04/mecanismos-transmision.pdf>



Mi cerebro solo es un receptor, en el universo hay un núcleo, del cual obtenemos conocimientos, fuerza e inspiración.

Nikola Tesla

Dicen que el tiempo no lo es todo,
pero para un verdadero MC,
si el tiempo te atrapa, el tiempo es Oro.

O. Conde D.

*Dios está enojado, por qué el humano no sabe cuándo
papará la masacre que el mismo ha inventado, siguen dando
malas aportaciones para hacerse millonarios, mientras la
pobreza hace de mi estado un lugar de marginados.*

O. Conde D.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño y construcción del Secador Solar Biomásico Rotatorio Automatizado (SSBRA), con aplicación para procesos térmicos industriales, para el deshidratado de granos de café, haciendo uso de los fundamentos teóricos que han sido reportados y mencionados en el capítulo anterior y que se enfocan en el análisis de este tipo de tecnología.

3.2 Metodología del SSBRA

El proceso para obtener el SSBRA, se muestra en la Figura 3.1, el cual será necesario seguir 4 etapas para su óptimo desarrollo e implementación; 1) Se considerará parámetros físicos del sistema, 2) Se presentará el diseño de todo el sistema desarrollado mediante la base teórica, 3) Se construirá en base al diseño realizado, se seleccionará y ensamblará, cada uno de los subsistemas al secador, finalmente, 4) se realizará la evaluación y funcionamiento del subsistema de control automatizado junto al SSBRA completo, en vacío y posteriormente con carga (café).

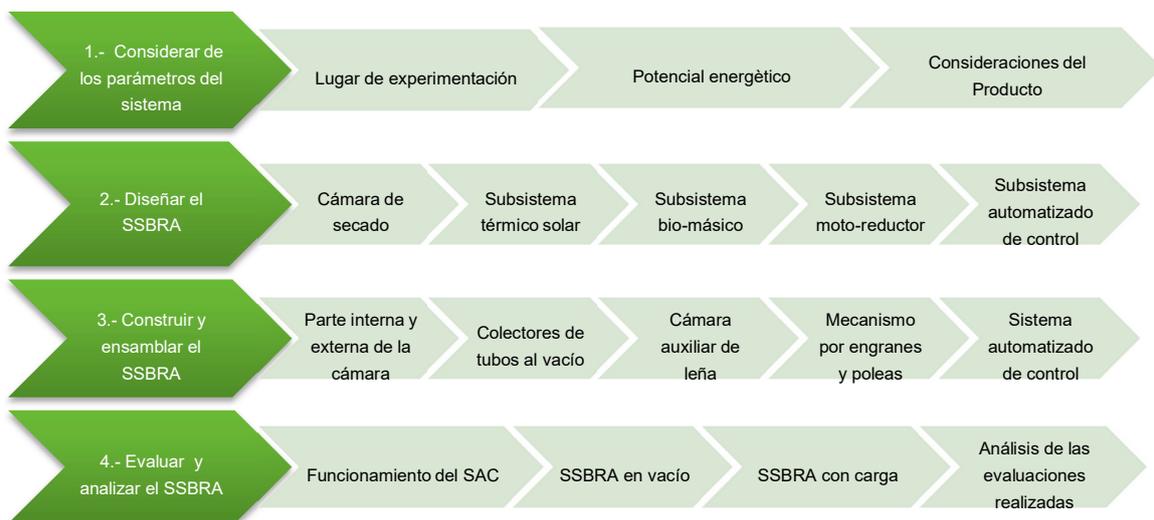


Figura 3.1.- Metodología empleada para el desarrollo del Secador Solar-Biomásico Rotatorio Automatizado (SSBRA).

3.3- Estudiar y considerar parámetros para el diseño del SSBRA

Algunos trabajos y libros relacionados al tema y que se han realizado anteriormente para el secado de granos de café, lo cual ha dado como resultado la obtención de información de gran interés, ampliando los conocimientos y obteniendo más datos para el desarrollo de este trabajo de investigación, mostrados en las siguientes referencias [1,2,3,4,5].

3.3.1 Lugar de experimentación

La etapa de diseño y experimental de este trabajo de investigación se realizará Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER), perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) ubicado en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, presenta una altura de 522 *m.s.n.m.* con un clima cálido, subhúmedo, con lluvias en verano y una temperatura promedio de 28.8 °C [6].

En la Tabla 3.1 se presentan algunas condiciones y parámetros externos útiles para la realizar los cálculos necesarios para el diseño.

Tabla I.- Consideraciones de parámetros de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas [7].

Parámetros	Latitud N	Longitud W	Temperatura ambiente	Humedad ambiente	Altura
	16° 45'	93° 08'	30 °C	65 %	522 <i>msnm</i>

3.3.2 Potencial energético

Para diseñar un secador solar, hay que hacer una evaluación de las condiciones meteorológicas de la zona donde se instalará el SSBRA, por medio de una estación actinométrica, donde se registran también otras variables: como la radiación solar que incide en el lugar, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa del aire ambiente. La estación actinométrica está ubicada en el IIER y está programada para la recepción de datos cada media hora.

El potencial energético solar y biomásico disponible en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, es mostrado en la Tabla 3.2, donde se observa una radiación solar promedio de 3.5 kWh/m^2 , alcanzando máximos de 5.4 kWh/m^2 .

Tabla II.- Potencial energético solar y biomásico disponible en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas [8].

Radiación solar		(kWh/m ²)		Leña (J/kg °K o MJ/kg °C)		
Promedio	3.5	Max.	5.4	Madera:	420	o' 17.580

3.3.3 Consideraciones del producto

Para obtener un funcionamiento del SSBRA óptimo y un deshidratado uniforme del producto a deshidratar es necesario conocer las características del mismo, en este caso, granos de café. En la Tabla 3.3 se observa los requerimientos extremos como la humedad inicial, humedad final y temperatura crítica del producto a deshidratar [9,10].

Tabla III.- Características y requerimientos extremos del producto a procesar en el secador rotatorio [9,10].

Producto	Contenido de humedad (%)		Densidad (kg/m ³)	Temperatura crítica (°C)	Requerimiento extremo (°C)
	Inicial	Final	ρ	T -	T+
Granos frescos					
Café	45-65	9-12	620	45	60

3.4- Diseño del SSBRA

Como se mencionado anteriormente, el SSBRA, contiene 5 subsistemas como son la cámara de secado, el subsistema de tubos al vacío, subsistema biomásico, subsistema de reducción de velocidad mediante (engranes y poleas) y el subsistema de control automatizado. El diseño de cada subsistema se describe a continuación.

3.4.1 - Cámara de secado del SSBRA

Para la cámara de secado será necesario una estructura que soporte el peso del mismo SSBRA y su contenido en producto, así como también sus respectivos sistemas de elevadores que irán en el interior de la cámara y que ayudará a mover los granos y homogenizar su secado del mismo.

3.4.2 Volumen de la cámara de secado

Para el diseño del prototipo de secador se partirá estimando una cantidad de 275 kg de producto de café, lo cual es el equivalente a (5 latas de 55 kg) que es el peso aproximado a lo que usan los cafetaleros en la región. A partir de este dato se basarán los cálculos para el dimensionamiento de la cámara de secado, considerando las características de los granos de café (ver Tabla III). Para encontrar el volumen de la cámara de secado utilizamos la siguiente ecuación:

$$m = (\rho * v) \quad (3.1)$$

donde m es la masa del producto (kg), ρ es la densidad del producto (kg/m^3) y v es el volumen del producto (m^3).

Como se mencionó anteriormente, se consideró que la masa total de que se partirá para el diseño es de (275 kg) de grano de café, y se considera que la densidad del café, es de ($620 kg/m^3$), por lo tanto, de la ecuación 3.1 determino el volumen de granos de café de $0.44 m^3$.

3.4.3 Dimensiones y selección de la cámara

El diseño de la cámara de secado, en base a los estudios realizados en [11], la cantidad de carga ideal en los secadores rotatorios, con el cual, el producto se deshidrata con mayor homogeneidad, se encuentra en una ocupación del (30 % al 40 %) del volumen total de la cámara de secado, por lo tanto, se decidió utilizar el 40% como referencia para la cantidad máxima de volumen de producto.

Entonces, para cumplir con esta característica la cámara de secado debe tener un 60 % más del volumen que el volumen del producto. Por lo que el volumen total de la cámara de secado debe ser de 1.10 m^3 .

Las dimensiones y selección de la cámara de secado dependen de la cantidad de producto a deshidratar. Teniendo la idea de una cámara de secado, donde se procesará y protegerá al producto, se consideran las características de los materiales como la resistencia y flexibilidad de los mismos, resistencia a altas temperaturas, etc., como que se muestran en la (Tabla IV). El SSBRA cuenta con una tecnología que impide la propagación de las bacterias que son las principales causantes de enfermedades, evitando los microorganismos, protegiendo al producto de los rayos UV [12], lo que significa que protegerá su calidad, siendo amigable con el producto (café).

Tabla IV.- Características de la cámara de secado interna y externa.

Características	Parte interna	Parte externa
Tipo o estructura	Rotoplas (cónica)	Cilíndrica
Diámetro [m]	1.55	1.62
Altura [m]	1.60	1.80
Peso [kg]	50	80
Material	Amigable al producto	Metálico-Aislante
Color	Negro	Recubrimiento plástico
Capacidad [m^3]	1100 litros = 1.1	
Tipo de tapa	Tapa	Cerrado

3.4.4 Aislante térmico

El cálculo del espesor óptimo del aislante puede ser determinado mediante el uso de la siguiente ecuación 3.4 [13].

$$d = \lambda a \left(\frac{\theta_m - \theta}{q} - \frac{1}{hi} - \frac{1}{ha} \right) \quad (3.2)$$

Donde, d es el espesor del aislante, λa la conductividad térmica operacional del aislante ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$), θ_m la temperatura del medio ($^{\circ}\text{C}$), θ_L temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$),

q es la densidad de flujo de calor (W/m), h_i el coeficiente de transmisión de calor en interior ($W/m^2.k$) y h_a el coeficiente de transmisión de calor en exterior ($W/m^2.k$).

Dentro de los aislantes existentes en el mercado, se decidió para la construcción del secador rotatorio, el Fomular rosa de (polietileno extruido), y sus características se muestran en la Tabla V. Este aislante es de alta resistencia a la humedad, que por su estructura de celdas cerradas no filtra el agua y sella cualquier hueco u orificio, también se utilizó la espuma poliuretano, debido a su baja conductividad térmica, y larga vida útil [14,15].

Estos tipos de materiales son los más utilizados comercialmente como aislante en los termo-tanques de los calentadores solares, utilizados en un promedio de 0.06 m de espesor, por lo cual se ha decidido mantener el mismo espesor en el prototipo.

Tabla V.- Características de la espuma de poliuretano.

Rango de temperatura de trabajo	-40 °C a + 90°C
Alta resistencia mecánica	-----
Densidad	30 kg/ m ³
Conductividad térmica K	0.024 W/mK

3.4.5 Cálculo de la demanda energética para el secado de Café

Para el diseño propuesto del secador, se propone procesar o secar 275 kg de café, considerando los requerimientos extremos de este producto, se toma una humedad inicial de 65 % y un humedad final del (11 a 12%), con una temperatura deseada de los granos de café de 55°C con un (+/-2) °C y una temperatura intermedia no mayor a los 60°C, considerando la temperatura crítica del producto [9], esto es para que no se deteriore, se calcula mediante la ecuación 3.5.

$$M_{wb} = W_w \left[\frac{W_{wi} - W}{(1 - W_w)} \right] \quad (3.3)$$

dónde, Mwb = Cantidad de humedad a eliminar (kg), Ww = Masa total del producto inicial (kg), Wwi = Fracción inicial de humedad base húmeda (%), Wwf = Fracción final de humedad en base húmeda (%) del café.

Sabiendo que la cantidad de café húmedo es de (165.62 húmedo en kg), se hace una diferencia con la cantidad húmeda de café a secar, la cual da como resultado, 109.375 kg , que es la cantidad de producto seco.

3.4.6 Cálculo de la energía necesaria para secar el producto (Café)

A partir de los kg de agua a evaporar de 1 kg de café, se realizará el cálculo de la cantidad de energía a suministrar, tomándose el valor recomendado de 4.185 kJ por kg de agua evaporada. Todo esto se calcula con la siguiente ecuación 3.6.

$$Q_s = \left[\left(4185 \frac{kJ}{kg \cdot C} \right) * (Mw) * (Tf - Ti) \right] / t \quad (3.4)$$

Sabiendo que Mw es la humedad de producto, Tf la temperatura final, Ti la temperatura inicial y t es el tiempo utilizado, se tiene que la cantidad de energía térmica a necesitar es de $Q_s = 75606.21 \text{ kJ}$.

3.4.7 Calculo del flujo de aire

Calculado la cantidad de energía del agua a evaporar y el consumo energético, se procederá a determinar la cantidad de aire para transportar la cantidad de calor, para mantener la temperatura de trabajo preestablecida.

Para calcular flujo de volumétrico del aire (m^3/s), se considerará la energía a suministrar de $Q_s = 75606.21 \text{ kJ}$, la temperatura de operación de 55 °C a una temperatura ambiente de 30 °C, Teniendo una diferencia de temperatura entre ellos de $\Delta T = 27 \text{ °C}$, donde el volumen de flujo viene dado con la siguiente ecuación 3.5.

$$Va = \left(\frac{Q_s * 1 \text{ gh}}{Cp * (Ti - Tf)} \right) \quad (3.5)$$

V_a = Flujo de volumétrico del aire m^3/s .

Q_s = Calor suministrado sistema kJ/s .

C_p = Capacidad calorífica volumétrica del aire $1.283 kJ/m^3 \cdot ^\circ C$

Calor específico del aire= $1012 (J/kg \cdot K)$ ($25^\circ C$, $1 atm = 101325 pa$).

3.5 – Diseño del subsistema térmico solar

3.5.1- Cálculo de la superficie del captador solar de aire

Para determinar la tasa de pérdida de calor del colector por convección natural, se tomarán en cuenta los siguientes parámetros;

- 1) Las condiciones de operación se considerarán estables.
- 2) El aire se considerará un gas ideal con propiedades constantes.
- 3) La presión a la cual se trabajará será de $1 atm$, estas características se pueden ver en (**Anexos A**) y la característica de los tubos en la Tabla VI.

Tabla VI.- Características técnicas de los tubos evacuados al vacío.

Modelo	Tubo vidrio solar al vacío
Material del vidrio	Tubo de boro silicato 33 de alta calidad
Diámetro del tubo de vidrio	90 mm
Diámetro del tubo de vidrio	50 mm
Espesor de vacío	5 mm
Longitud	1800 mm
Espesor de las paredes de vidrio	1.8 m
Peso de un solo tubo	2.0 kg
Material de absorción	Cobre
Coefficiente de absorción	0.90- 0.93
Resistencia del viento	30 m/s
Tiempo de vida (años)	20 años

La longitud característica en este caso es la distancia entre los dos cilindros que viene dada en la ecuación 3.6.

$$L_c = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (3.6)$$

donde, L_c es la longitud característica, D_o es el diámetro exterior y D_i es el diámetro interior.

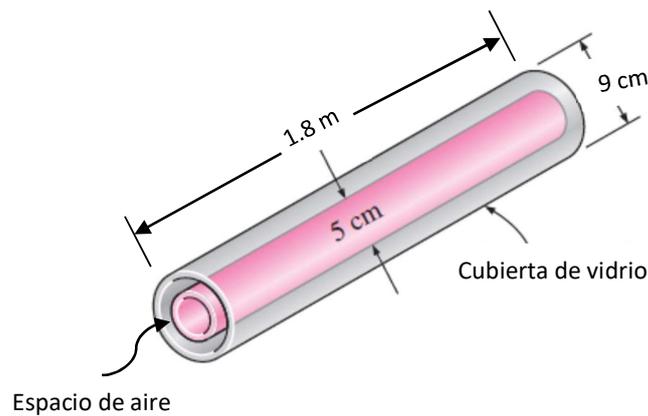


Figura 3.2 Dimensiones del tubo al vacío [2].

También se determinará el número de Rayleigh (Ra) para el fluido, este es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido. Cuando el número de Rayleigh está por debajo de un cierto valor crítico ($Ra < 10$), la transferencia de calor se produce principalmente por conducción; cuando está por encima del valor crítico ($Ra > 1000$), la transferencia de calor se produce principalmente por convección y viene dada por la ecuación 3.7.

$$Ra = \frac{g\beta(T_i - T_o)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (3.7)$$

Dónde Pr es el número de Prandtl, g la aceleración de la gravedad, L_c la longitud característica, T_i la temperatura de la superficie caliente, T_o la temperatura del fluido alejado de la superficie caliente, ν la viscosidad cinemática y β el coeficiente de expansión térmica.

Por lo tanto, la razón de transferencia de calor del colector por metro cubico de longitud del tubo se convierte con la ecuación 3.8.

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_{eff}}{\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right)} (T_0 - T_i) \quad (3.8)$$

Sin embargo, para poder determinar ese valor antes se tuvo que determinar la conductividad térmica efectiva F_{cy1} , por medio de la ecuación (3.9).

$$F_{cy1} = \frac{\left[\ln\frac{D_0}{D_i}\right]^4}{L_c^3\left(D_i^{-\frac{3}{5}}+D_0^{-\frac{3}{5}}\right)^5} \quad (3.9)$$

Para la realización del área del colector (A_c), se requiere de una energía térmica a suministrar, en este caso el calor requerido por el día para evaporar el agua del producto ($Q_s = 75606.21 \text{ kJ} = 2609.7241 \text{ MJ} = 2.6097 \text{ GJ}$), también se propondrán la fracción de energía solar a suministrar ($F_s \text{ del } 80 \% = 0.8$), la irradiancia solar promedio anual ($I = 7.3 \text{ GJ/m}^2 \text{ año}$) y la eficiencia térmica promedio del sistema solar de tubos al vacío ($n_{ss} = 70 \%$, $r = 0.70$) el número de días en el año.

La ecuación para encontrar el A_c , se efectúa con la siguiente ecuación 3.10.

$$A_{efec} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)}{G_{solar} \cdot \eta_{asumida} \cdot t} \quad (3.10)$$

donde, m , es la cantidad de aire a calentar (kg), C_p es el calor específico del fluido ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$), T_f es la temperatura del aire caliente ($^\circ\text{C}$), T_i es la temperatura del aire frío ($^\circ\text{C}$), G_{solar} es la radiación solar promedio (kWh/m^2).

También se realizará el cálculo de número de tubos, con la ecuación 3.11

$$N_{tubos} = \frac{A_{efec}}{\pi \cdot D_i \cdot L_{ta}} \quad (3.11)$$

Donde, A_{efec} es el Área efectiva del colector (m^2), D_i es el Diámetro del colector (m), L_{ta} es la Longitud del tubo (m).

También se realizará el cálculo de calor útil, dada por la siguiente ecuación 3.12, donde sus parámetros ya están descritos anteriormente.

$$Q_{\text{útil}} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)}{t} \quad (3.12)$$

3.5.2- Tuberías, inyector y extracción de aire

La selección de los ductos que recorren dentro del sistema de captación solar serán realizárs a partir de tubos de CPVC que alcanzan arriba de los 80 °C, de (2 pulgadas) en el cual el extremo que conecta hacia el sistema de calentamiento biomásico y luego se conecta a la cámara de secado, también se acoplará el inyector de aire a la entrada del sistema de tubos evacuados, para comenzar el recorrido, y para la extracción de aire se acoplarán tubos CPVC de ($\frac{1}{2}$ pulgadas) estratégicamente, para que pueda salir la humedad mediante un sistema de ventiladores de 12 V.

Conocer cuál es el flujo másico de aire que se debe de suministrar para secar una masa de un producto en un tiempo determinado es muy importante para realizar una correcta selección del extractor de aire. Es importante conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire que se necesita para extraer la humedad adecuada del producto.

Para conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire \dot{m}_a , se parte de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por el café, Q_w es igual al producto del calor perdido o cedido por el aire Q_{a1} y la eficiencia de secado η_s .

$$Q_w = \eta_s * Q_{a1} \quad (3.14)$$

3.6- Selección del subsistema biomásico auxiliar de (Leña)

De acuerdo a todos los diseños antes realizados de las estufas Lekil Vaj, Enérchia, Ecochia y Llamalinda en el IIER, de la UNICACH, se propuso el diseño de una cámara de combustión auxiliar biomásico de leña, con el único objetivo ayudar a sustentar y elevar la temperatura, cuando la cámara de secado lo requiera o sea necesario, ya sea en días de radiación nula o en trabajos nocturnos, o cuando el subsistema de calentamiento por tubos al vacío no entregue la temperatura deseada a la cámara de secado.

El subsistema biomásico fue construido y evaluado para no sobrepasar la temperatura del recubrimiento térmico que alcanza los 450 °C, teniendo una buena combustión en la introducción de la leña, debido a que el subsistema es cilindro en su interior, tiene buena distribución térmica, alcanzando temperaturas altas a la salida del caudal de 170 °C, para lograr sustentar la temperatura dentro de la cámara de secado, también se diseñó la parte conexión de la tubería de tubo galvanizado para la resistividad de la temperatura del sistema, en su interior se encuentra una malla o serpentín para retener el aire caliente que llegara a la cámara.

3.7.- Diseñar subsistema de moto-reductor

Se realizaron los cálculos necesarios para diseñar el sistema de transmisión de poleas y engranes, para la reducir la velocidad del motor a 5 (rpm), el cual llevará con ello una etapa de potencia que pueda regular la potencia de arranque del motor, obteniendo como resultado un movimiento muy suave, pero con mucho torque para que el movimiento de arranque no afecte a los engranes como a los granos de café.

3.7.1 Motor de 1537 rpm

Se tomará como referencia un motor eléctrico y sus características en la Tabla 3.7, con ciertas características de 1725 rpm para lograr que el tambor rotatorio alcance las velocidades óptimas para el secado del café, variando de 3 a 5 rpm para que su secado sea homogéneo [16].

Tabla VII.- Características del motor eléctrico.

Marca	WEG
Potencia	<i>2 Hp</i>
Tipo	Eléctrico
Características	Flechas cuñero de 5/8"
Dimensiones	<i>45x26x21 cm</i>
Frecuencia	<i>60 Hz</i>
Motor	Monofásico
Polos	4 polos
RPM	<i>1725 rpm</i>
Voltaje	<i>110 V/220 V</i>

3.7.2.- Sistema de poleas y engranes

Se realizará el diseño de sistema de trasmisión movimiento mediante poleas y engranes, en la Tabla 3.8 se puede ver las características de los mismo, este sistema tendrá poleas para bandas *B-24*, el engrane de diámetro mayor mide *94 cm*, mientras que el más pequeño (piñón) alcanza los *12 cm*.

Tabla VIII.- Características de las poleas, banda y engranes.

Transmisión	Poleas	Bandas	Engranes
Pequeña	<i>12 cm</i>	B-24	14 dientes
Mediana	<i>33 cm</i>	B-24	
Pequeña	<i>12 cm</i>	B-24	
Grande	<i>27 cm</i>	B-24	164 dientes

El diseño que se realizará, también tiene un sensor de frenado o vaciado, mediante un sensor inductivo (mediante imanes), para que pueda calcular y adaptarse al momento óptimo para poder recoger el producto después de llegar a su humedad buscada por el sistema.

3.8.- Diseñar subsistema automatizado de control

Para el diseño del sistema automatizado de control (SAC), se simulará y se implementará el sistema de control completo junto con la etapa de potencia, en el software **PCB Wizard**, también se realizó un diagrama a bloque del sistema y de su etapa de potencia para la reducción de velocidad de arranque y de frenado, todo

ello para evitar dañar los engranes cuando arranque el motor, se seleccionará la tarjeta de control Arduino (ya que tiene muchos beneficios aparte de ser bajo en costo), se diseñará el sistema de adquisición de datos y de cada uno de los componentes que lo integraran, junto a su conexión con sus actuadores (soplador y motor), configurando y programando así, la tarjeta de control mediante el Software de Arduino C++, (Anexo C), para tener un mejor diseño y funcionamiento del al construir el sistema automatizado de control del SSBRA.

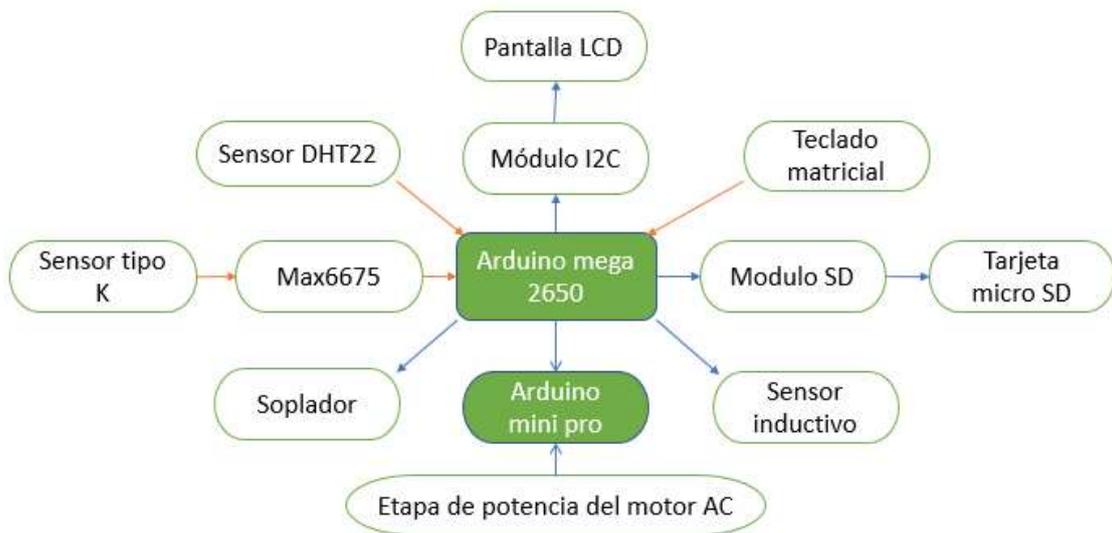


Figura 3.3 Diagrama a bloque del sistema automatizado de control.

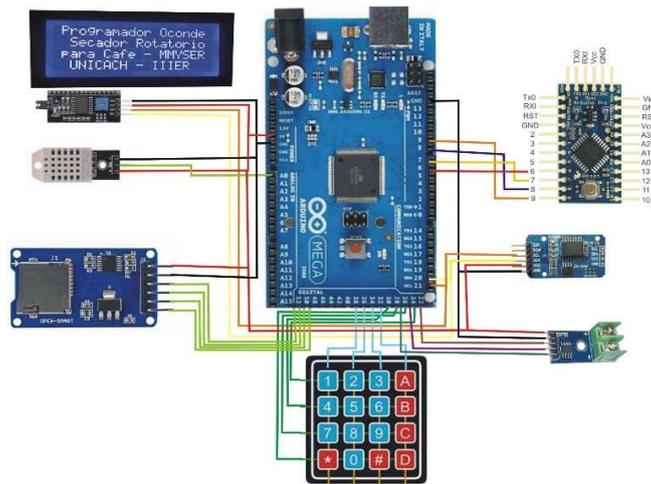


Figura 3.4 Diseño del sistema automatizado de control. Fuente: propia.

3.9.- Construcción y ensamble de todo el SSBRA

Para construcción y ensamble del SSBRA, se partió del diseño realizará usando el software **Solikword**, para cada uno de los subsistemas que lo integran, junto con cada uno de sus componentes, conexiones, actuadores, con las dimensiones reales para después pasar al proceso de construcción.

3.9.1.- Construcción y ensamble de los subsistemas del SSBRA

El principio de construcción de todos los subsistemas del secador solar biomásico rotatorio automatizado, se realizará en dos áreas, el sistema automatizado de control se realizó en el laboratorio 1, y el todo el desarrollo mecánico del dispositivo, fue en el taller de usos múltiples del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER) de la UNICACH al igual que la evaluación del SSBRA.

3.9.2.- Parte interna y externa de la cámara de secado

El proceso de construcción de la cámara de secado, se comenzará reforzando el contenedor para los granos, encapsulándolo con monten de ½ pulgada, seguido de su recubrimiento térmico de poliuretano y foamular, para posteriormente pasar con la fabricación de la puerta hermética en un costado, seguido de los elevadores de granos en el cual están basados en la investigación realizada por (Van Puyvelde, 2009) y donde presenta su trabajo que lleva por título “Modelling the hold up of lifters in rotary dryers”, en el cual hace un estudio de diferentes inclinaciones de los elevadores para granos, y se optó por utilizar el modelo de elevador A, presentado en la Figura 3.7, debido a que dicho modelo presenta un rango de deslizamiento para que los granos puedan moverse y deslizarse de mejor forma para su homogeneidad, por lo cual se insertaron 4 elevadores fijados a la cámara de secado, lo que implica mayores beneficios en el proceso de secado de granos, el proceso de construcción se puede apreciar en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Construcción de la cámara de secado, A) la puerta hermética, B) sistema de movimiento interno de los granos y C) eje trasversal de soporte con ranuras para la entrada de aire caliente. Fuente: propia.

3.9.2.1.- Eje transversal y orificios de extracción

También se colocará un tubo como eje transversal de acero inoxidable, con diámetro es de (0.06 m) y una longitud de (2.39 m), donde entrara la el aire caliente con ciertas ranuras de (0.099 m), estratégicamente a lo largo del tubo, por el cual entra el aire caliente dentro de ella, con dos valeros, uno en cada extremo del eje para que pueda tener movimiento y soporte de la estructura, el eje esta sujetado a 3 pedestales de tubo de hierro de (0.077 m) cada uno, anclados al piso, para que pueda sostener toda cámara de secado en movimiento, teniendo 12 orificios de 0.029 m, estratégicamente colocados alrededor de la cámara de secado, para poder extraer la humedad dentro de ella, de forma natural, Figura 3.6.



Figura 3.6 – A) Puerta hermética junto con orificios de extracción de aire y B) Soporte de la cámara junto a la tubería de entrada de aire. Fuente: propia.

3.9.2.2.- Sistema de elevadores o palas

Para el interior de la cámara de secado se fabricará 4 elevadores, fijada mediante tornillo de acero inoxidable para que no contaminen el producto, la cual está basada en investigaciones realizadas por [17], esparcidamente con su trabajo “Modelling the hold up of lifters in rotary dryers”, en el cual hace un estudio de diferentes inclinaciones de los elevadores para granos, se optó por utilizar el modelo de (elevador A) presentado en la (Figura 3.3), debido a que dicho modelo presenta un no presenta rango de retención de material, al contrario el producto tiende a deslizarse en forma de cascada, lo cual implica mayores beneficios en el proceso de secado de granos.

Tabla IX.- Detalles del segmento del elevador A.

Elevador A con inclinación 90°	Tamaño del segmento m
Largo	0.28
Ancho	0.0003
Alto	0.011

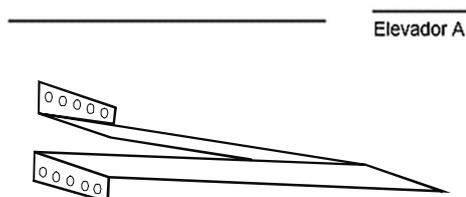


Figura 3.7 Ilustración de los elevadores o palas.

3.9.2.3.- Puerta hermética y orificios de extracción de humedad

Se realizará un corte a la cámara de secado en medio, para abrir una puerta, con una longitud es de 0.30 m , y con un ancho de 0.40 m , para la entrada y salida de producto, teniendo un grosor dependiendo el recubrimiento térmico de 0.006 m , mostrado en la Figura 3.5.

3.9.3.- Construir y ensamblar colectores A y B por tubos al vacío

La construcción y el ensamble de los tubos evacuados al vacío, se realizará en el mediante un proceso de fabricación, que con respecto al diseño el área de captación solar, se encuentra conformada por dos arreglo de 20 tubos evacuados al vacío con su colector de CPV-C (recubierta de fibra de vidrio en su interior) de 0.099 m de

diámetro cada uno, teniendo dentro otro tubo concéntrico de 0.49 m, aislado térmicamente con poliuretano, conectados en serie, por la cual en su interior de cada tubo al vacío se le fue colocada un serpentín de acero galvanizado de (0.012 m), por el cual circula un flujo de aire forzado, el cual es calentado a medida que fluye a través de los serpentines que tienen por dentro los arreglos de los tubos evacuados al vacío, todo soportado por una estructura del material de hierro de (Cintro verde) de (0.038 m), para cada subsistema, como se puede apreciar en la Figura de abajo.

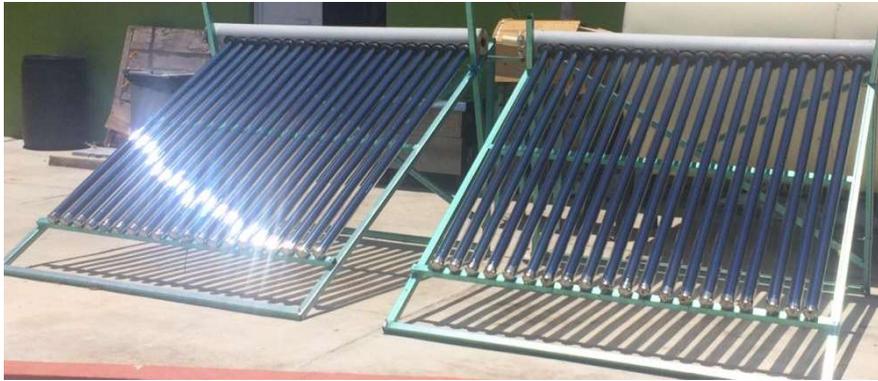


Figura 3.8 Subsistema de calentamiento de aire solar. Fuente: propia.

3.9.3.1.- Equipo de inyección de aire caliente

Conocer cuál es el flujo másico de aire que se debe de suministrar para secar una masa de un producto en un tiempo determinado es muy importante para realizar una correcta selección del extractor de aire.

Para conocer cuál debe ser el flujo de masa de aire \dot{m}_{a1} , se parte de la hipótesis de que el calor de vaporización ganado por el café \dot{Q}_w , es igual al producto del calor perdido o cedido por el aire \dot{Q}_{a1} y la eficiencia de secado η_s [18].

$$\dot{Q}_w = \eta_s * \dot{Q}_{a1} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_w * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{\eta_s * Cp_{a1} * \Delta T_{al}} \quad (3.16)$$

En la anterior ecuación (3.10), \dot{m}_w es el flujo de masa de agua extraído del café pergamino, Cp_w es el calor específico para el vapor de agua, ΔT_w es el cambio de temperatura que experimenta el café pergamino en la etapa del secado, h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua, Cp_{a1} es el calor específico para el aire atmosférico y ΔT_{al} es el cambio de temperatura que experimenta el aire en la etapa del secado.

El flujo de masa de agua extraído del café pergamino \dot{m}_w , es igual a la masa de agua extraída del producto en un período de tiempo. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{producto}}{t} (w_o - w_f) \quad (3.17)$$

En la anterior ecuación 3.11, $m_{producto}$ es la masa de café pergamino a secar, w_o y w_f son la humedad inicial y final del café respectivamente y t es el tiempo que se hace pasar el aire por el café para asegurar que la humedad final del café sea la correcta.

En reporte presentado, (Orozco Hincapié y Bedoya Loaiza) determinan el flujo másico y el caudal de aire necesarios para deshidratar distintas cantidades de material, dentro de los cuales se encuentra el flujo másico necesario para deshidratar distintas cantidades de producto, de la cual se usó el método de extrapolación de datos de este modelo que ya ha sido validado y por tanto se implementó en nuestro secador solar rotatorio determinándose así el caudal de aire mínimo necesario siendo este $0.299 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla X.- Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café [14].

Masa de café (kg)	Flujo másico de aire (kg/s)	Caudal de aire (m³/s)
100	0.7	0.583
150	1.04	0.867
175	1.22	1.017
200	1.39	1.158
250	1.74	1.45
275	1.91	1.592

Es por ello que a partir de la determinación del flujo másico mínimo requerido por un inyector de aire, se localizaron y adquirieron un sopladores Makita UB1103 (Figura 3.9), los cuales proporciona un caudal de aire máximo de 4.10 m³/s, los cuales cubren satisfactoriamente dicho flujo másico requerido [19].



Figura 3.9 Soplador Makita UB1103 [19].

3.9.3.2.- Conexiones y tuberías

Las conexiones fueron seleccionadas con una tubería especial de CPVC de 80 °C por donde recorrerá el fluido caliente (aire), y no sobre pase su grado térmico, aislándose así del ambiente para no tener pérdidas de calor.

3.9.4.- Construcción de la cámara auxiliar biomásico de leña



Figura 3.10 Subsistema biomásico auxiliar.
Fuente: propia.

El proceso de construcción del subsistema de calentamiento de aire auxiliar de la Figura 3.10, se realizará mediante un proceso de fabricación, donde un cilindro de gas, se modificó como cámara de combustión, recubriéndolo con 4 tipos de material para aislarlo, 1) Piedra térmica, 2) Ladrillo, 3) Lana de vidrio y 4) Madera, en su interior hay una cámara metálica de forma cilíndrica, donde entra y sale aire mediante tubos de (0.05 m), en medio del cilindro se expande a (0.10 m) donde se calienta el aire que pasa circulando hacia la cámara de secado, con su chimenea, una puerta, una parrilla para sostener el combustible (leña), específicamente para oxigenar y tener una mejor

combustión a la hora de introducir el combustible ya que la parte de abajo de la cámara de combustión es cóncava, este subsistema fue evaluado por el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) de la UNICACH.

3.9.5.- Construcción del mecanismo por engranes y poleas

El proceso de construcción del subsistema de transmisión de movimiento mediante poleas y engranes de la Figura 3.11, se realizará mediante un proceso de fabricación, el cual está dividido en tres etapas de transmisión desde el motor hasta la cámara giratoria, donde se encuentra conformada junto a un engrane, principalmente por un sistema de transmisión de poleas con sus respectivas correas, para ello se emplearon, un motor de 2 HP, 4 poleas de diferentes medidas de doble banda y un eje giratorio intermedio conectado a 3 chumaceras, también se diseñó su



Figura 3.11 Subsistema de transmisión movimiento.
Fuente: propia.

estructura para el soporte de todo el subsistema, el cual tuviera la resistencia de soporte de todo el peso.

3.9.6.- Construir y ensamblar el subsistema de control automatizado SAC

La construcción y el ensamble del sistema de control automatizado, se realizará en el laboratorio 1, del IIIER, respecto al diseño se parte en dos secciones, la primera sección, es una etapa de potencia que regule la velocidad de arranque del motor, junto a un sensor inductivo, para frenar la cámara rotatoria, en la segunda etapa se realizará el sistema de adquisición de datos con el módulo de micro SD de (Figura 3.12), junto al visualizador por LCD, en la (Figura 3.13), con un teclado matricial en la (Figura 3.14), etc. Se realizará la programación de todo el sistema mediante una tarjeta de control Arduino mega (Figura 3.15), que ordena y ejecuta las órdenes a controlar de los actuadores (soplador y la etapa de potencia del motor), los sensores de las variables (temperatura y humedad) de la (Figura 3.16), a base de tiempos, programando la temperatura ala que debe de operar y el porcentaje de humedad final a 12 %, para frenar el proceso, todo el sistema se pondrá en una caja metálica anticorrosiva, para después adáptalo al secador.



Figura 3.12 Modulo micro SD. **Figura 3.13** Pantalla LCD. **Figura 3.14** Teclado matricial.

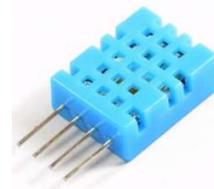
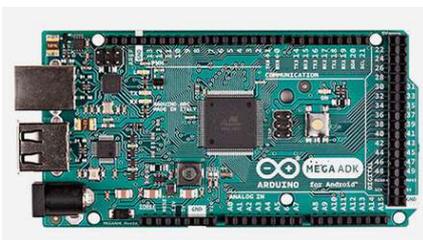


Figura 3.15 Tarjeta Arduino Mega. **Figura 3.16** Sensor de temperatura (der) y humedad (izq).

Todo el sistema se controlará mediante un control, para tener una mejor autonomía del sistema, es necesario que sea alimentado a la corriente eléctrica, para que todo el subsistema funcione correctamente, aparte de ciertas protecciones, para no afectar los circuitos electrónicos de la humedad de la intemperie.



Figura 3.17 Sistema automatizado de control (SAC).

3.10.- Metodología de evaluación del SSBRA

La evaluación de todo el secador solar biomásico rotatorio, se realizará mediante un sistema automatizado de control mencionado en la (sección 3.8), aparte de aparatos de medición, como el anemómetro para saber la velocidad del flujo de aire y la temperatura a la que sale del caudal de cada subsistema, y el solar meter, para saber la radiación incidente en un punto determinado (el punto de referencia es la altura media de los tubos evacuados).



Figura 3.18 Flow anemómetro.



Figura 3. 19 Solar power meter.

3.10.1.- Funcionamiento del sistema SAC

Se realizará una evaluación para verificar el sistema automatizado de control completo, para saber el comportamiento del sistema de adquisición de datos, como de las variables, actuadores y posibles conexiones, censado de cada uno de ellas en las evaluaciones que se realizarán de cada subsistema, como también de la etapa de potencia del motor, verificando que mantenga un arranque y un frenado con torque lento mediante un sensor inductivo.

3.10.2.- Evaluación del SSBRA

Se realizarán las pruebas necesarias para determinar el funcionamiento correcto del sistema de automatizado de control en el laboratorio, como en campo, junto a las evaluaciones de cada subsistema, para determinar su comportamiento de acuerdo al diseño y construcción, el rendimiento del dispositivo, llevando a cabo procesos experimentales simples y eficientes.

Para después poder realizar evaluaciones del secador solar rotatorio automatizado completo, en vacío y con carga, teniendo un mejor control así de los parámetros críticos y necesarios, para poder deshidratar los granos de café en menor tiempo manteniendo sus propiedades organolépticas.

Los parámetros tomados en consideración para la parte experimental en la evaluación de rendimiento del secador solar biomásico rotatorio automatizado, son la radiación solar incidente y temperatura del ambiente. Dichos datos fueron tomados de los valores registrados por la estación meteorológica mostrado en la Figura 3.20.



Figura 3. 20 Estación meteorológica Vantage Pro 2.
Fuente: <http://ecuadorgps.com>.

3.10.2.1 Evaluación al vacío

La realización de la prueba en vacío del prototipo del secador solar biomásico rotatorio, se realizará sin el producto que se va a secar, esto con la finalidad de conocer el comportamiento del sistema durante el periodo de calentamiento del aire, evitando con esto tener que retirar humedad de la cámara de secado proveniente de un sólido higroscópico, dicha evaluación proporciona datos importantes para el análisis y determinación del comportamiento térmico del aire en el sistema.

Para dicha prueba se empleará un sistema de control automatizado mediante la tarjeta de control Arduino, antes mencionados en la sección (3.9.6). Dichos sensores capturan los parámetros de humedad y temperatura de la cámara de secado que son evaluados en vacío (sin producto), y otro sensor calculan las vueltas en la que girará la cámara, el cual tendrá duración de 12 horas, mismo proceso es evaluado durante un periodo consecutivo de 2 días, con los cual se descartan errores por factores climatológicos o externos al sistema, como de su funcionamiento al girar la cámara de secado.

3.10.2.2- Evaluación con carga

La segunda evaluación del prototipo del secador solar biomásico rotatorio automatizado, se realizará con carga (con producto a secar), se tiene como objetivo la recopilación de datos como la variación de temperatura dentro de la cámara de secado, la masa inicial y final del producto, así como el porcentaje de humedad inicial y final contenida en el producto.

El análisis de la prueba con carga permite determinar comportamiento térmico del sistema y la obtención de las curvas de secado del producto, ya que cuando se encuentra presente un sólido higroscópico al interior de la cámara de secado existe una variación en la humedad y temperatura del fluido de trabajo en este caso particular el aire.

Al igual que con la prueba en vacío el subsistema de control automatizado, con los intervalos de medición de los parámetros de humedad y temperatura, con la velocidad de rotación, tienen una duración de 9 horas, durante un periodo consecutivo de 2 días.

Con el fin de determinar la variación de humedad contenida en el producto a lo largo del proceso de secado, se debe de retirar (5 g del producto) del interior de la cámara de secado en intervalos de una hora, la muestra tomada de manera aleatoria del interior del secador es pesada en una balanza en la (Figura 3.19).



Figura 3. 21 Balanza electrónica para medir humedad. Modelo VE-50-5.

3.10.3.- Análisis de las evaluaciones

Se realizará un análisis de los posibles resultados guardados en la adquisición de datos del sistema de control automatizado, donde se presentarán gráficas de tiempo contra temperatura, humedad y radiación para ver el comportamiento de todo secador solar biomásico rotatorio completo y del proceso de secado del producto, como también de las revoluciones por minutos en que trabajará este sistema.

3.11.- Conclusiones

El secador solar biomásico rotatorio automatizado, se establecieron las ecuaciones particulares para determinar el correcto diseño, construcción y evaluación del prototipo.

Se diseñará con base al potencial energético disponible y las necesidades energéticas de los productos, el cual está constituido por dos colectores solares de tubo de vacío con un área de captación solar total de 9.18 m^2 , un subsistema auxiliar de leña y un soplador de 600 W . La cámara de secado es un barril de 1.1 m^3 . Cuenta con una estructura para la colocación de los colectores solares la cual mide 9.30 m de largo, 1.6 m de ancho y 2 m de alto. Además, el SSBRA tiene un sistema automatizado de control para establecer y controlar los parámetros de secado en la cámara, En base a los valores obtenidos poder seleccionar y proponer mejoras en el diseño del secador solar que permitan un mejor aprovechamiento del sistema en los procesos de secado.

Bibliografía

- [1] Duffie J. A. and Beckman W. A. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. Editorial John Wiley & Sons, Interscience. EUA. Pp. 3-40.
- [2] Weimar A. G. M. y Roilan I. D. Diseño, Construcción y Evaluación de un Secador Solar Rotatorio. Tesis. Junio 2019.
- [3] Roilan I. D., Joel P. E. y Guillermo I. D.. Diseño, Construcción, Evaluación y Validación de un Secador Solar para el Secado del Té Limón. Tesis. Octubre 2013.
- [4] Irene M. P. y R. Sebastián R. R.. Modelado y construcción de un secador solar híbrido de residuos biomásicos. Tesis. Noviembre (2005).
- [5] Van Puyvelde, D. R. (2009). Modelling the Hold Up of Lifters in Rotary Dryers. Chemical Engineering Research and Design, 87(2), 226–232.
- [6] INEGI. (2020). Climatología, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Retrieved from: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Descargas>
- [7] CONAGUA. Normales Climatológicas 1981-2000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Comisión Nacional del Agua.
- [8] CONACYT – Convocatoria Chis-2017-02. “Fortalecimiento de la Infraestructura para la Investigación Científica, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Materia de Energías Renovables en el Estado de Chiapas”.
- [9] Guadalupe P. G. y Joel P. E., Sistema Híbrido Termo-Solar Eólico para la Conservación de Productos Agropecuarios. Tesis. Febrero 2015.
- [10] M. De Lucia y D. Assennato. La ingeniería en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha, *FAO, Viale delle Terme di Caracalla 00100 Roma, Italia, (1993)*. <http://www.fao.org/3/x5041s/x5041S00.htm#Contents> .
- [11] Sper Berna, J. R., & Torres Córdova, I. X. (2009). Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio.
- [12] Tinaco, Sistema Equipado, tri-capa. Rotoplas, más y mejor Agua. http://www.corporacionlexus.com/pdf/tanque_rotoplas_hogar.pdf?wmode=transparent
- [13] Metodología de cálculo de espesores óptimos de aislamiento térmico. (2007). Retrieved from: http://www.f2e.es/uploads/doc/20170615102007.aislamiento_industrial_part_2.pdf
- [14] <https://disenobioclimaticoybiomimetico.wordpress.com/2014/11/05/material-de-consulta-propiedades-termicas-de-los-materiales/>
- [15] <https://pedrojhernandez.com/2014/04/09/caracteristicas-termicas-de-los-materiales/>
- [16] Fonseca F. S., Abdala Rodríguez J. L., Pantoja E. J, Torres Y. A. 2000. Análisis Térmico del Secador Solar de Tambor Rotatorio para Granos. Tecnología Química Vol. XX, No. 3.
- [17] Van Puyvelde, D. R. (2009). Modelling the Hold Up of Lifters in Rotary Dryers. Chemical Engineering Research and Design, 87(2), 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.08.018>.

[18] Orozco Hincapié, C. A., & Bedoya Loaiza, F. (2007). Cálculo del Flujo Másico y Caudal de Aire para un Ventilador Utilizado en Silos para Secado para el Café. *Scientia Et Technica*, XIII(35), 207–212.

[19] <https://www.makitatools.com/es/products/details/UB1103>.



No creo que haya alguna emoción más intensa para un inventor, que ver alguna de sus creaciones funcionando, esa emoción hace que uno se olvide de comer, dormir y de todo.

Nikola Tesla

Comprendí que las maquinas, son la mayor contaminación de ruido, que no necesitan del sol para vivir, si se le construye su propio generador de luz, la cual será la mayor destrucción del hombre gris, que se olvidará de amar, echando a un lado sus sentimientos, por eso su destino está en enamorarse de alguien que no tenga corazón, con mucha inteligencia y sin la luz de amor propio.

O. Conde D.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL SSBRA

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta los análisis y resultados obtenidos de las evaluaciones del secador solar biomásico rotatorio automatizado (SSBRA), en el IIIER de la UNICACH, donde principalmente se evaluó con ayuda del subsistema automatizado de control (SAC), para determinar el estado y comportamiento de la cámara de secado, así como de los subsistemas que suministran la energía térmica con lo cual se consiguieron establecer los parámetros de operación del sistema para el correcto deshidratado de los granos de café.

El funcionamiento del secador solar biomásico rotatorio automatizado, cuenta con el SAC, el cual permite establecer y mantener constantes los parámetros de secado de acuerdo a las características del producto, como son la temperatura y humedad del aire en la cámara, ya sea durante el día, en días nublados o poca radiación, ya sea muy temprano o en horas de trabajo nocturno, como también de su eficiencia térmica de todo el sistema SSBRA, para tener un mejor comportamiento del secador, aprovechando los potenciales energéticos solar y de la leña, transformándola en energía para calentar el aire y deshidratar el producto de café.

Para la evaluación de todo el SSBRA, se realizaron pruebas del comportamiento del proceso de calentamiento del fluido (aire), dividiéndolo en dos etapas, en vacío, con carga, posteriormente con un análisis de sus posibles resultados, con lo cual se lograron obtener las curvas de secado del café.

4.2 Resultados del estudio y consideración de los parámetros del sistema

Todo el estudio realizado así como los parámetros del sistema y las consideraciones que se tienen que tomar en cuenta del producto a deshidratar, se obtuvieron mediante la búsqueda bibliográfica de diferentes artículos, libros, revistas así como también mediante la comunicación de caficultores y expertos en el tema, en los que se obtuvieron como

resultados, los parámetros críticos, características y requerimientos extremos del producto a procesar en el dispositivo, arrojando así los siguientes datos:

- 1) Tiene que haber un proceso de despulpado o de pretratamiento, esto lleva a que la humedad inicial descienda de un 85 % a un 65 %.
- 2) El café no puede bajar de los 45°C, ni pasar de los 60°C, tomando en cuenta una temperatura de 55 °C, para no dañar sus propiedades organolépticas.
- 3) El movimiento del dispositivo debe tener una remoción lenta de 5 rpm, para no dañar a los granos por quiebre o golpeteo.
- 4) Se requiere una cámara de secado aislada al ambiente para proteger a las propiedades del café de afectaciones climatológicas como por agentes biológicos.

4.2.1 Demanda energética

Un kilogramo de café húmedo tiene un volumen de 0.0016 m³ de acuerdo a la ecuación 3.1. Para eliminar la humedad de 1 kg de café, este cuenta con una humedad inicial de 65% y se requiere alcanzar una humedad de equilibrio del 12% teniendo una masa húmeda de 0.6022 kg (ecuación 3.3), la cantidad de energía a suministrar para lograr extraer la humedad es de 83139.21 kJ (ecuación 3.4), con una temperatura de 55 °C.

En cuanto al flujo de aire requerido para el deshidratado de los granos de café, se tomó como referencia lo reportado por [et. Van Puyvelde,2009,1], donde presentan una lista de flujo de aire mínimo necesario para la cantidad de 275 kg de café, es de 1.592 m³/s, para tener un secado óptimo. El calor útil para un 1 kg de café es de 0.035 kJ (ecuación 3.7).

4.3 Resultados del diseño del dispositivo

Además de lo mencionado en el capítulo 3 para el diseño de la cámara de secado, se determinaron las características necesarias para el subsistema de reducción de velocidades, junto a su etapa de potencia para su posible reducción de velocidad

mediante el SAC. A continuación, se presenta en la Tabla 4.1 los resultados de las operaciones e información anteriormente citadas.

Tabla XI.- Parámetros para el diseño del SSBRA.

Parámetro de diseño	Ecuación	Resultado
Capacidad de la Cámara	40 %	1.10 m ³
Área de captación	$A = \frac{m * C_p * (T_f - T_i)}{G_{solar} * \eta_{asumida} * t}$	9.18 m ²
Número de tubos	$N_{tubos} = \frac{A}{\pi * D_i * L_{ta}}$	33 tubos al vacío
Aislante	$d = \lambda_B \left(\frac{\theta_M - \theta_L}{q} - \frac{1}{h_1} - \frac{1}{ha} \right)$	6.1 cm Espuma de poliuretano Coeficiente de conductividad térmica: 0,023 W/(m·K)
Subsistema biomásico	Estufa ecológica implementada en el IIIER	Alcanza temperaturas de 80 a 450°C con 5 kg de leña.
Subsistema de transmisión o reducción de velocidad	Transmisión por poleas: $n1 \cdot \theta1 = n2 \cdot \theta2$ Transmisión por engrane: $z1 \cdot n1 = z2 \cdot n2$	El motor eléctrico WEG que mejor se acoplo a estas características fue el Dayton modelo 1 LPP7A de 5 RPM y 1500 W
Subsistema de control automatizado	Tarjeta de control Arduino Mega 2560 y actuadores	Potencia consumida 2220 W*h
Cantidad de energía mediante los colectores para 1 kg	$Q_s = (4185 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot W_w \cdot (\Delta T)$	83139.21 kJ
Calor útil de energía para 1 kg	$Q = m \cdot C_p \cdot (\Delta T)$	0.035 kJ

4.4 Funcionamiento del SSBRA

El funcionamiento del secador solar biomásico rotatorio automatizado está regido por el subsistema automatizado de control (SAC), el cual permite establecer y mantener constantes los parámetros de secado de acuerdo al producto que se requiere procesar, con dos principales parámetros, los cuales son la temperatura y humedad en la cámara de secado. En la Figura 4.1 se describe el funcionamiento del SSBRA.

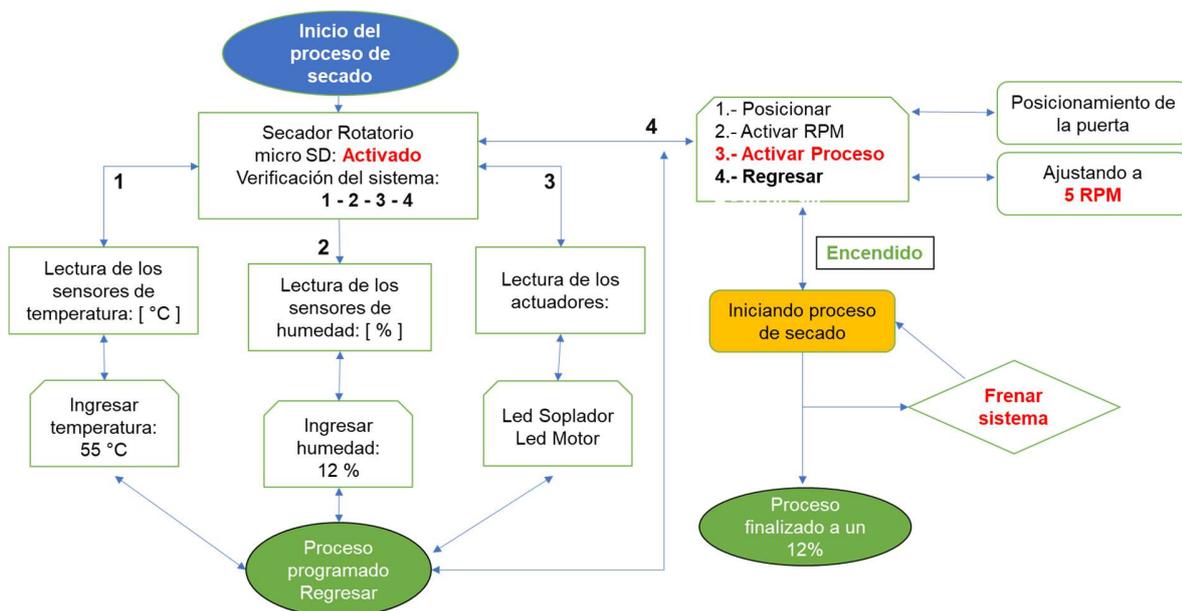


Figura 4.1.- Diagrama a bloques del sistema automatizado de control.

Como paso inicial del proceso, se introduce el producto a deshidratar a la cámara rotatoria, seguido se inicia el SAC, el cual es ordenado por el usuario, para establecer la operación, donde se entra a un menú para verificar los sensores y actuadores en funcionamiento, transmitiéndola la información a una pantalla LCD y ver los valores de los sensores.

Por otro lado, se tiene un teclado matricial, en el cual se le puede ingresar los siguientes parámetros:

- 1) Temperatura, se visualiza la temperatura al instante y se asigna un valor de temperatura en un rango de 53 a 57°C.
- 2) Humedad, se visualiza la humedad en el instante y se asigna un valor de humedad en un rango de 10 a 12%.
- 3) Soplador, alerta si el “indicador de leña y el soplador de aire” están en funcionamiento con un indicador de luz led.
- 4) Ingresa a otro menú el cual da las opciones:
 - 1) Posicionar, el sistema se posiciona para que, mediante el sensor inductivo, frene el sistema localizando la puerta, para su descarga de los granos de café.
 - 2) Encender el motor, pone en marcha al motor del sistema con un torque suave hasta llegar a 5 rpm.
 - 3) Activar cámara de secado, inicia el proceso de secado, con todo lo programado por el sistema para su posible funcionamiento, guardando la información de las evaluaciones en una micro SD y dando la opción de frenar el sistema, para detener a todo el sistema de inmediato en caso de emergencia.
 - 4) Regresar, al bucle anterior para reprogramar el sistema.

En el caso de que el sistema se active o se encienda, el sistema de transmisión comenzará a mover la cámara rotatoria, incrementando lentamente su velocidad hasta llegar a las 5 rpm, se enciende el soplador forzando al aire a pasar por los colectores solares de aire, conectados en serie, para calentarse, elevando así su temperatura indicando por un led (Amarillo), pasando por el sistema auxiliar de leña, el cual suministra la energía térmica faltante en días nublados o trabajos por las noches o ya sea muy temprano, indicado por un led (Verde), el aire forzado que circula por todo el sistema, pasa por un eje que atraviesa y soporta la cámara de secado, teniendo ciertas ranuras, para introducir el aire y esparcirlo para obtener un secado homogéneo, el led (Rojo) indica el frenado del sistema, cuando el proceso finalice a su humedad ideal programada del 12%.

4.4.1 Funcionamiento del suministro de energía térmica del SSBRA

El suministro de energía térmica para la cámara de secado durante el día, es entregada por los subsistemas de calentamiento de tubos al vacío **A** y **B**, que están conectados en serie, captando la radiación solar incidente, para calentar el flujo de aire, que pasa por el ducto del sistema auxiliar biomásico, pero sin activar el indicador de leña (led verde), hasta llega a la cámara de secado, con la temperatura deseada entre 55 a 60°C, en el caso contrario que se pase del rango programado, se manda a apagar el soplador de aire, esperando que la temperatura baje.

En el caso que el día este nublado, por la noche o muy temprano, cuando el subsistema por tubos al vacío no aporta la suficiente temperatura para alcanzar los 55°C dentro de la cámara de secado, el suministro de energía térmica, es dado por el subsistema biomásico auxiliar, que, mediante el SAC, manda a activar el indicador de leña, indicando que es necesario suministrarle combustible, para elevar la temperatura en la cámara de secado, de 53 a 57°C, teniendo un rango de +/- 3°C.

Todo el sistema se interrumpe cuando el producto se deshidrata a una humedad de equilibrio del 12%, indicando que el sistema se ha completado correctamente su deshidratado, finalizando así la operación del sistema.

4.4.2 Demanda de la energía eléctrica del SSBRA

Para determinar la cantidad de energía eléctrica requerida para que el sistema funcione durante 1 hora, se sumó la potencia de los actuadores utilizados en el SAC, de 2220 *kW*h*, tomando en cuenta los consumos eléctricos de los equipos proporcionados por el fabricante y se multiplican por el número de horas de funcionamiento, dando la suma de todos los consumos una alta demanda total de energía de más 2 *kW*h*.

Tabla XII. Tabla de consumo eléctrico de los actuadores del SAC del SSBRA.

Actuadores	Potencia	Tiempo	Consumo
Motor monofásico	1500 W	1 h	1500 W*h
Soplador	600 W	1 h	600 W*h
Etapa de potencia	120 W	1h	120 W*h
Potencia total	2220 W	3 h	6660 W*h

4.5 Resultados y análisis del proceso de construcción del dispositivo

El análisis realizado de todo proceso de construcción del dispositivo de SSBRA, está basado en los resultados del diseño presentados en la sección 4.2 y 4.3. En la Figura 4.2 y 4.3, se observa el diseño propuesto en SOLIKWORK, que conforman al dispositivo de secador solar biomásico rotatorio automatizado.

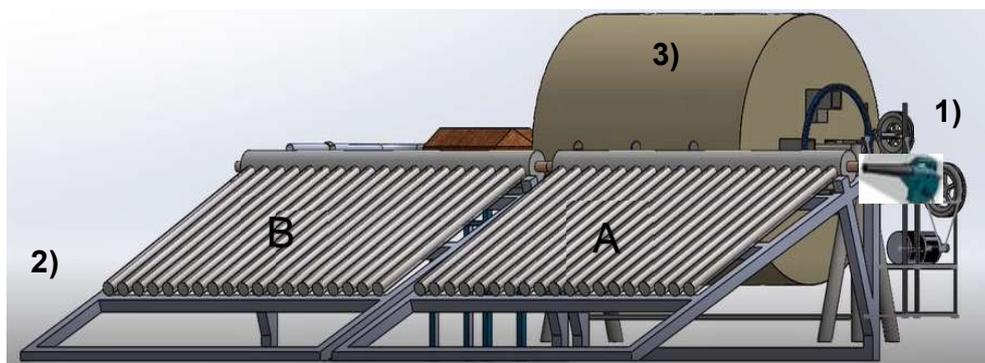


Figura 4.2 Componentes principales del secador solar biomásico rotatorio automatizado, parte uno: 1) Soplador de aire, 2) Colectores solares A y B, 3) Cámara de secado rotatoria. Fuente: propia.

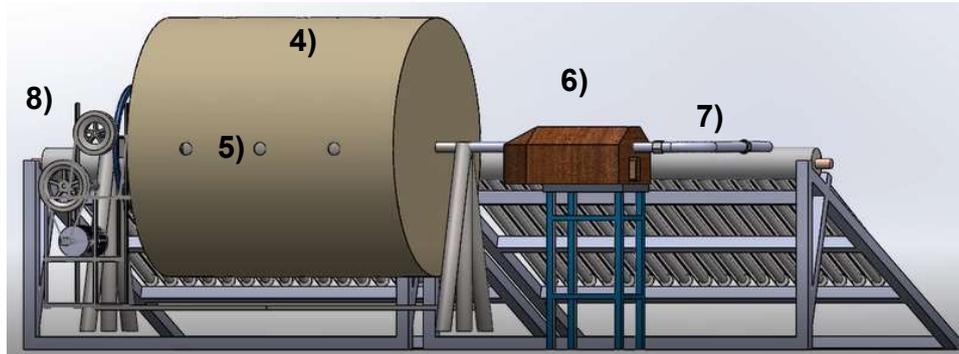


Figura 4.3 Componentes principales del secador solar biomásico rotatorio, parte dos: 4) Cámara rotatoria de secado, 5) Extracción de aire, 6) Subsistema biomásico de respaldo, 7) Tubería y conexiones 8) Subsistema de transmisión de velocidades.

En base al diseño antes mencionado se realizó la construcción y ensamble de todo el dispositivo de secado, comenzando con la parte interna y externa de la cámara de secado, como se muestra en la Figura 4.4 y la conexión de los subsistemas térmicos de energía junto al soplador en la Figura 4.5, toda la construcción se llevó a cabo en el taller de usos múltiples, la fabricación de las placas y el sistema automatizado de control, se construyó en el laboratorio 1, del IIIER de la UNICACH.



Figura 4.4 Proceso de construcción de la cámara de secado rotatoria, 1) Encapsulamiento de la cámara rotatoria con metal y recubrimiento aislamiento térmico,

2) Colocación de la puerta hermética A y B, 3) Colocación de elevadores y orificios de extracción de humedad, 4) Eje transversal de la cámara de secado, con ranuras para la salida de aire caliente, 5) Cámara junto con su tripie de soporte y baleros, eje donde recorre el aire caliente, cubierta de una placa de fibra de vidrio.

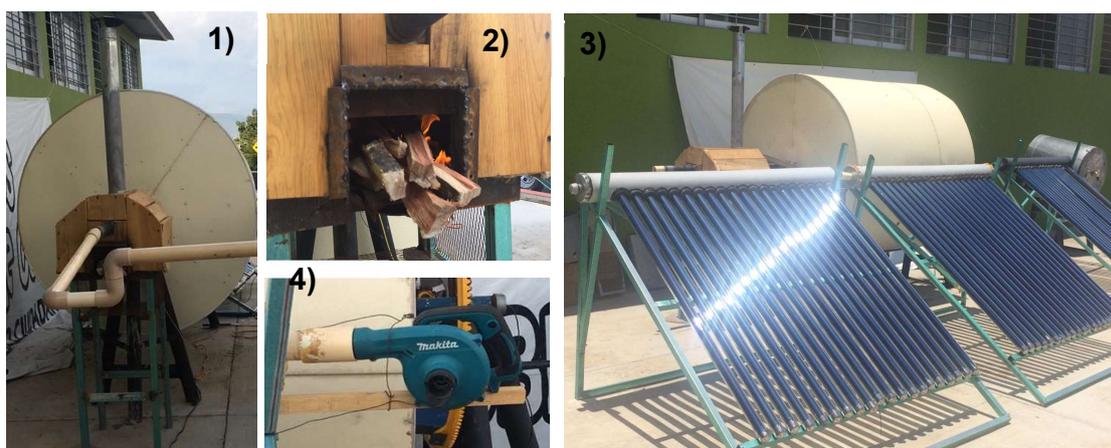


Figura 4.5 Implementación de los subsistemas de calentamiento de aire: 1) Conexión de la cámara rotatoria junto al subsistema biomásico auxiliar y conexión de tuberías, 2) Introducción de leña, 3) Subsistemas de calentamiento por tubos al vacío conectados en serie, 4) Soplador de aire Maquita.

Para la construcción del subsistema de transmisión para reducción de velocidad, mostrado en la Figura 4.6, se desarrolló partiendo de un motor de 2 HP de 1735 rpm antes descritos, 4 poleas de diferentes medidas con sus respectivas bandas de transmisión (B-24), 2 un eje giratorio intermedio con su chumacera, un par de engranes (Piñón y corona), también se diseñó su estructura de soporte para todo el subsistema.

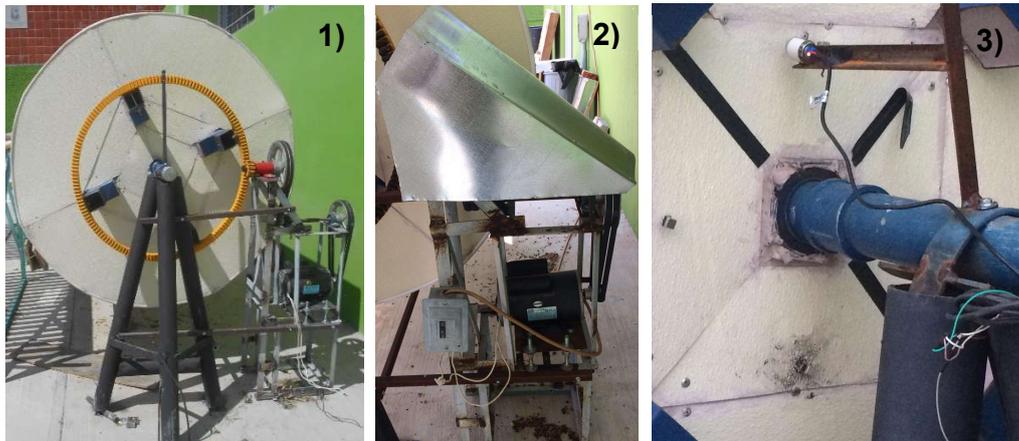


Figura 4.6 Proceso de construcción y ensamble del sistema de reducción de velocidades: parte trasera :1) Subsistema de transmisión por engranes y poleas junto al motor *2HP*. 2) Implementación de protección del subsistema de velocidades junto a la caja eléctrica. 3) Implementación del sensor inductivo para el frenado del sistema.

La primera transmisión, la realiza un motor eléctrico que gira a 1735 rpm , unido sólidamente a una polea pequeña de 17 cm , que conduce la transmisión de movimiento a una segunda polea de 27 cm , cada una situadas a 60 cm , reduciendo la velocidad a 447.125 rpm , este está conectado a un eje que gira mediante dos chumaceras, con la misma velocidad de giro, para pasar a una tercera transmisión mediante una polea chica de 17 cm , a otra polea grande de 20 cm , reduciendo así considerablemente la velocidad a 93.72 rpm , para la última transmisión, está dada mediante otro eje con una chumacera distinta, conectada a un (Piñón) de 14 dientes que hace girar un (Aro grande) de 64 dientes , conectado en la parte trasera de la cámara de secado, para hacerla girar 5 rpm , lo que es óptimo para el secado homogéneo de los granos sin dañar sus propiedades organolépticas.

El proceso de fabricación e implementación del subsistema automatizado de control, fue llevado a cabo en el laboratorio de control del IIIER de la UNICACH. En la Figuras 4.7, se observa el SAC terminado, desde la impresión de placa hasta la implementación y ensamble del mismo en el SSBRA.

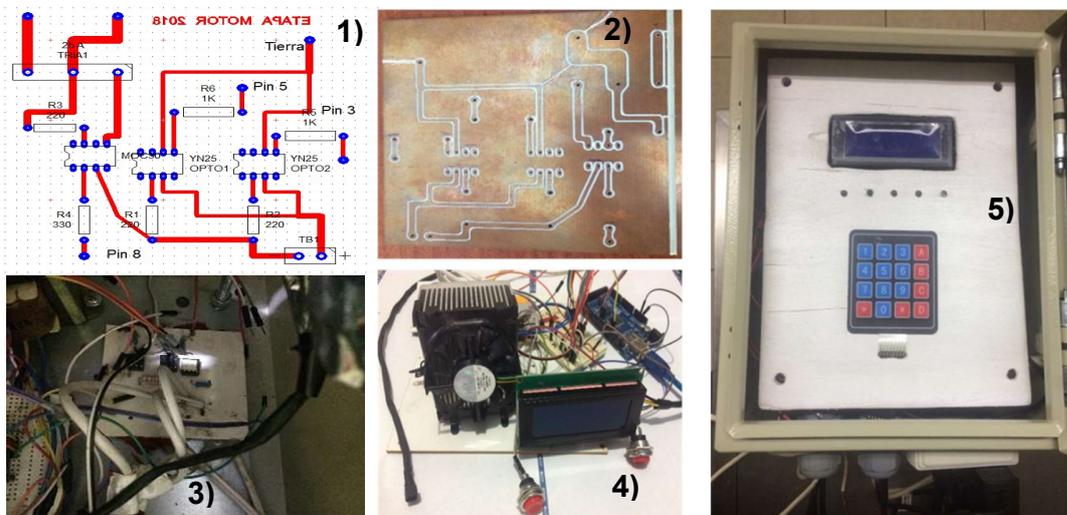


Figura 4.7 Proceso de construcción e implementación del sistema automatizado de control: 1) Diseño del circuito electrónico, 2) Impresión de la placa, 3) Soldadura de los circuitos, 4) Conexión con la Tarjeta Arduino Mega 2560, 5) SAC completo.

4.6 Análisis de los subsistemas de calentamiento de aire solar - biomásico

Se analizó la evaluación de los subsistemas térmicos junto a la cámara de secado rotatoria a 5 rpm, donde se hace circular aire caliente, conectado al subsistema de tubos al vacío colector **A**, que después pasa por el colector **B**, seguido hacia el subsistema biomásico, y posteriormente hacia la cámara de secado, donde la inyección de aire esta conectado a un sistema automatizado de control con adquisición de datos, para guardar la información de la medición de los sensores de temperatura y humedad, también se ocuparon 2 aparatos de medición (un solarímetro y un anemómetro), para saber la radiación solar, como la temperatura y velocidad del aire que entra en la cámara de secado, como también para saber las condiciones de los parámetros ambientales con la estación meteorológica del IIER .

4.6.1 Subsistema de calentamiento aire por tubos al vacío A y B

La primera evaluación se le realizó al subsistema de calentamiento de aire por tubos al vacío **A** y **B**, junto a la cámara rotatoria de secado en vacío, el día 10 de noviembre del 2019, durando 8 horas, iniciando a las 9:30 horas, finalizando a las 17:30 horas.

En la evaluación se programó el soplador de aire para encenderse cada 30 *min* y con un descanso de 20 *min*, se colocaron dos sensores de temperaturas a la salida del caudal del subsistema de calentamiento por tubos al vacío llamados (**colector A y B**), junto con un sensor de temperatura y humedad dentro de la cámara de secado, se tomaron los datos de la velocidad y temperatura a la que sale el aire del caudal, mediante los aparatos de medición, como la radiación solar incidente para ese día.

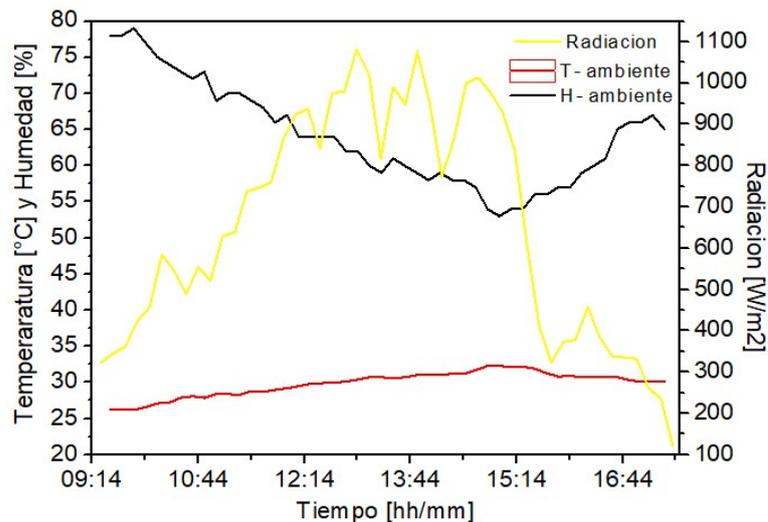


Figura 4.8 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 10 de noviembre de 2019.

En la Figura 4.8, se analizó los datos adquiridos por la estación meteorológica del IIIER, se observa las condiciones ambientales promedio para el día de la evaluación, donde se obtuvo una temperatura de 27°C (*línea roja*) y humedad de 80% (*línea negra*) bajando hasta un 54%, se analizó que mediante la radiación solar aumentaba la humedad decaía. Debido a las diversas nubes de ese día la radiación estuvo intermitente con una radiación

4.6.2 Análisis del subsistema de calentamiento térmico auxiliar biomásico

La evaluación del subsistema biomásico de combustión de leña junto con la cámara de secado con una rotación de 5 rpm, fue realizada el día 11 de noviembre del 2019, con una duración 8 horas, iniciando a las 18:21 pm y finalizando a la 2:21 am. Se inició con una cantidad de combustible leña de 25 kg, introduciéndose manualmente. Se realizó el análisis para conocer el comportamiento de la temperatura a la salida del caudal de la cámara de combustión biomásico auxiliar leña, como también el comportamiento de la temperatura y humedad dentro de la cámara de secado, así como la del ambiente, con las mismas condiciones del SAC para las mediciones.

En la Figura 4.10, se analizó el comportamiento del subsistema de calentamiento biomásico de leña junto a la cámara de secado, donde en las primeras 2 horas, se alcanzó una temperatura promedio de 65°C, en la salida del caudal del subsistema biomásico de leña (*línea naranja*), aumentando con picos de temperatura promedio 90°C en el valor más alto teniendo un decaimiento a 85°C, debido a que la introducción de leña no fue constante, disminuyendo su temperatura lentamente debido a la brasa de la leña, llegando a alcanzar dentro de la cámara de secado una temperatura 68°C (*línea roja*) con una humedad de 22% (*línea negra*) promedio, y una temperatura ambiente aproximadamente 22°C (*línea azul*).

La temperatura dentro de la cámara de secado se mantuvo arriba de los 55°C durante 5 horas, manteniendo una temperatura buena de 2 horas más, después de la evaluación debido a la brasa de la leña.

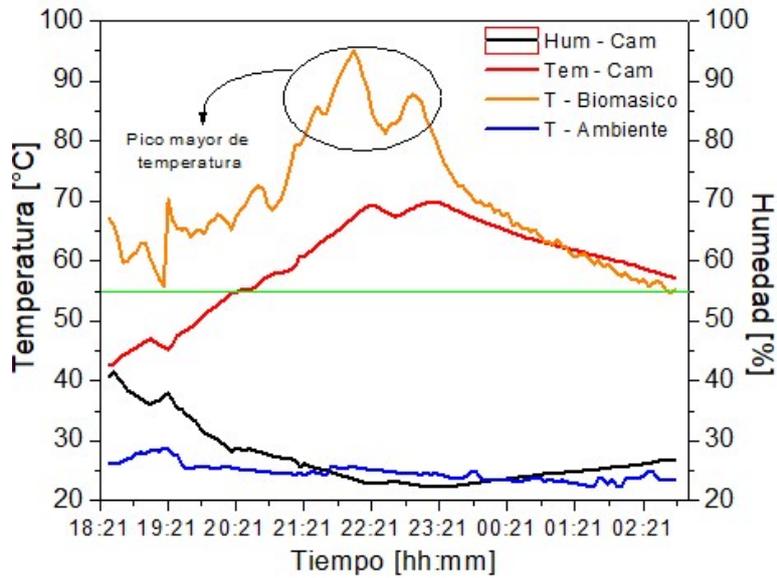


Figura 4.10 Análisis del comportamiento térmico de la cámara junto al sistema de auxiliar de leña.

4.7 Análisis del sistema completo del SSBRA en vacío

La evaluación realizada de todo el secador solar biomásico rotatorio automatizado, se realizó el día 17 de noviembre del 2019, con una rotación de 5 rpm, con una duración 8:14 horas, se inició las 8:44 am y se terminó a las 19:30 pm, monitoreado por el SAC.

En la Figura 4.11, se analizó los datos adquiridos por la estación meteorológica del IIIER, donde se observa una temperatura del ambiente aproximada de 25.5°C, una humedad de 80% bajando hasta un 60% y volviendo a incrementar después de la radiación solar, teniendo una radiación promedio de 700 W/m² durante 6 horas desde las 10:00 am a las 16:00 pm.

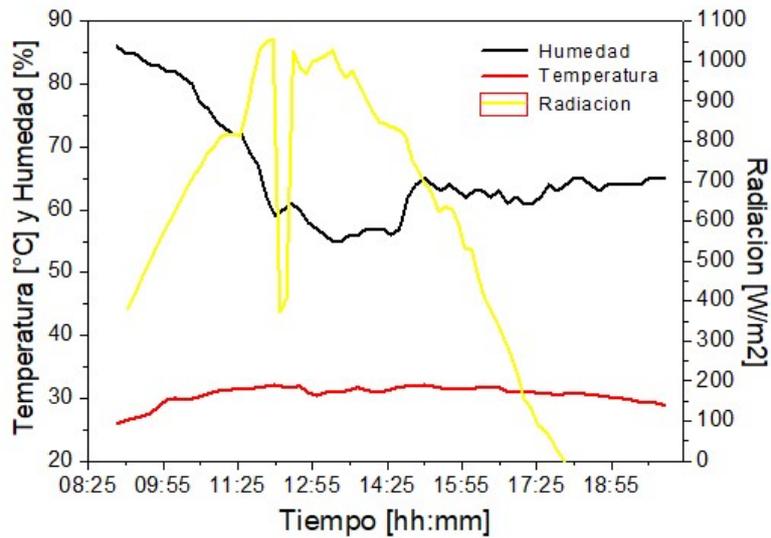


Figura 4.11 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 17 de noviembre de 2019.

En la Figura 4.12 se analizó el comportamiento de todo el secador solar biomásico rotatorio automatizado, durante el día de la evaluación. Como se ha mencionado antes, se hace circular aire mediante un soplador conectado al subsistema térmico de tubos al vacío, (**colector A**), que después pasa por el (**colector B**), posteriormente para el subsistema de auxiliar de leña y finalmente llega a la cámara de secado. La temperatura en la salida del **colector A** (*línea azul*) alcanzó picos de temperatura de 95°C y sumándose en la salida del **colector B** (*línea verde*) alcanzó picos de temperatura de 115°C, debido a que el subsistema biomásico (*línea naranja*), solo es para ocasiones especiales de noche o poca radiación, se alcanzó picos de temperatura a la salida de 70°C, llegando a una temperatura promedio dentro de la cámara de 65°C (*línea roja*) y una humedad del 23% (*línea negra*), alrededor de las 15:44 horas. Durante la tarde-noche (17:44 horas), debido a que la radiación solar decae, se activó el subsistema biomásico auxiliar de leña, alcanzando picos de temperatura 120 a 139°C (*línea naranja*), para aumentar la temperatura que posteriormente entra a la cámara de secado, incrementando temperatura a 73°C con una humedad a 18%, lo que es muy óptimo para el proceso de secado dentro del dispositivo, consumiéndose así 7 kg de leña en 2 horas,

esto se debe a que hay un serpentín en medio del subsistema lo que hace que el aire pase lentamente que el eje transversal donde entra el aire caliente a la cámara, entrando de una forma indirecta debido a las ranuras en su interior de la cámara se secado para no dañar a la directo al producto.

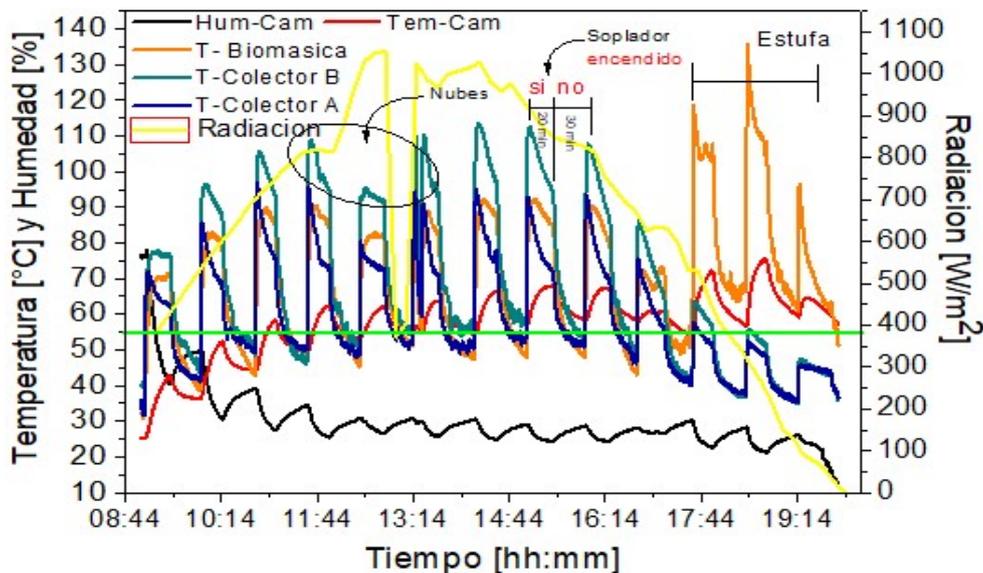


Figura 4.12 Análisis del comportamiento térmico del todo sistema SSBRA en vacío.

Se analizó la radiación solar para ese día de 700 W/m^2 promedio, durante 5 horas 10:45 am a 16:15 am, debido a que el día estuvo nublado, la radiación tuvo un decaimiento alrededor de las 13:00 pm.

4.7.1 Análisis del calentamiento de aire dentro de la cámara de secado

En la Figura 4.13, se analizó el comportamiento del flujo de aire que pasa por cada uno de los subsistemas térmicos hasta llegar a la cámara de secado rotatoria, teniendo una velocidad del aire en el caudal de 5.9 m/s (línea negra) promedio, pero dentro de la cámara mediante las ranuras tuvo una velocidad de salida a 2.5 m/s , a temperatura 55°C (línea roja), durante 4 horas, teniendo caídas de temperatura hasta los 50°C debido a las nubes, pero teniendo una buena la inyección de aire, según el diseño propuesto.

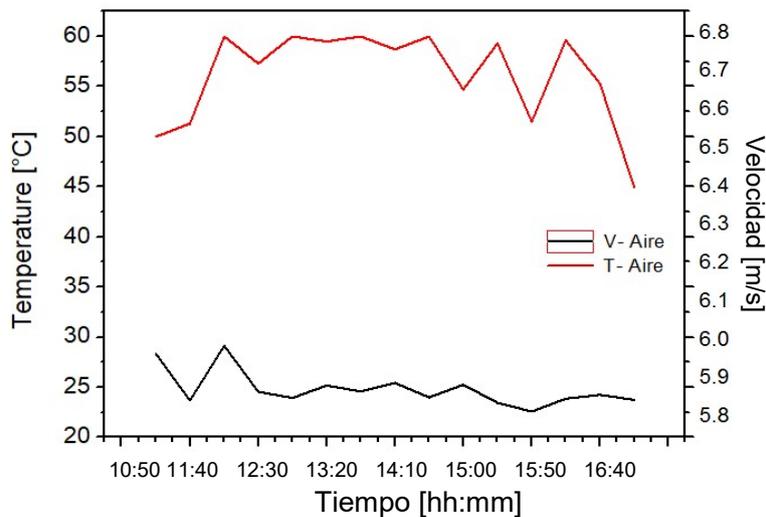


Figura 4.13 Temperatura y velocidad del aire a la salida de la cámara de secado.

4.7.2 Análisis del comportamiento de la humedad en el SSBRA en vacío

En la Figura 4.14, se muestra la evaluación del comportamiento de la humedad en el interior de la cámara respecto a la humedad del ambiente, que se obtuvieron durante las pruebas en vacío del SSBRA. Donde la humedad de la cámara en la primera media hora desciende a un 40% (*línea negra*) y la humedad ambiente (*línea azul*) con un 25%. Se muestra cómo va descendiendo la humedad de la cámara hasta un 12%, esto se debe a que el ambiente estaba muy húmedo en el día.

En relación a los porcentajes de humedad que se registran en la Figura 4.15, donde se aprecia que los niveles en los porcentajes de humedad dentro de la cámara rotatoria sin producto, no exceden el 55% por tal motivo el sistema automatizado de control detecta que este valor no excede lo estipulado en su programación, por cual, se le asigna una humedad inicial del 12%, que por ende, el dispositivo tiende a realizar la extracción de humedad de forma constante mediante los 12 orificios estratégicamente colocados a su alrededor.

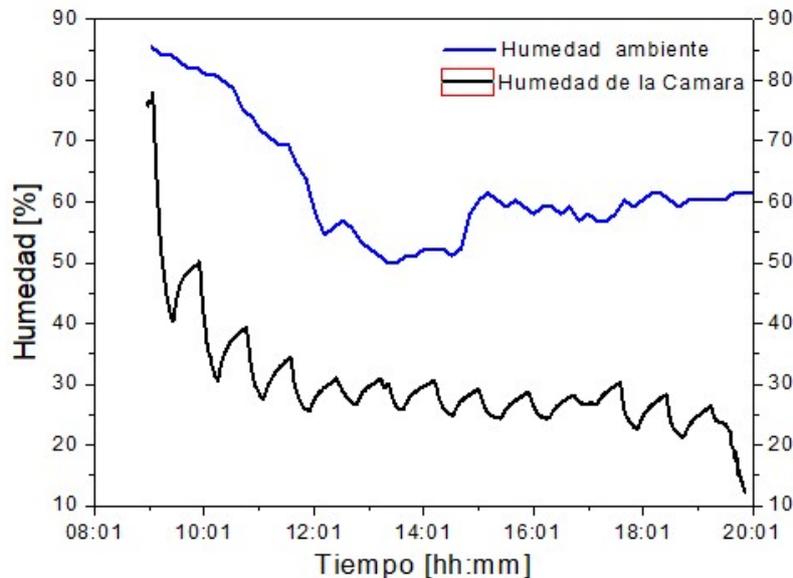


Figura 4.14 Análisis de la variación de la humedad relativa dentro la cámara de secado y humedad del ambiente, en vacío.

Todas las pruebas en vacío se realizaron en un periodo de 9 horas continuas, de trabajo por el día y parte de la noche, el cual consistió en monitorear los parámetros de temperatura y humedad de cada subsistema de calentamiento de aire y de todo el sistema completo SSBRA, como del aire en el interior de la cámara rotatoria con todo el dispositivo operando en vacío, con lo cual se pudieron descartar fallas mecánicas, y térmicas de cada subsistema del dispositivo, como también eléctricas, con lo cual se corroboró el correcto funcionamiento del subsistema automatizado de control.

4.8 Análisis del sistema completo del SSBRA (Con producto)

Para las pruebas experimentales de secado se empleó una cantidad de 275 kg de café pergamino, que se introdujo en el dispositivo de secado, esta prueba se realizó el 31 de marzo del 2020. En la Figura 4.15, se observa los parámetros ambientales de la estación meteorológica del IIER.

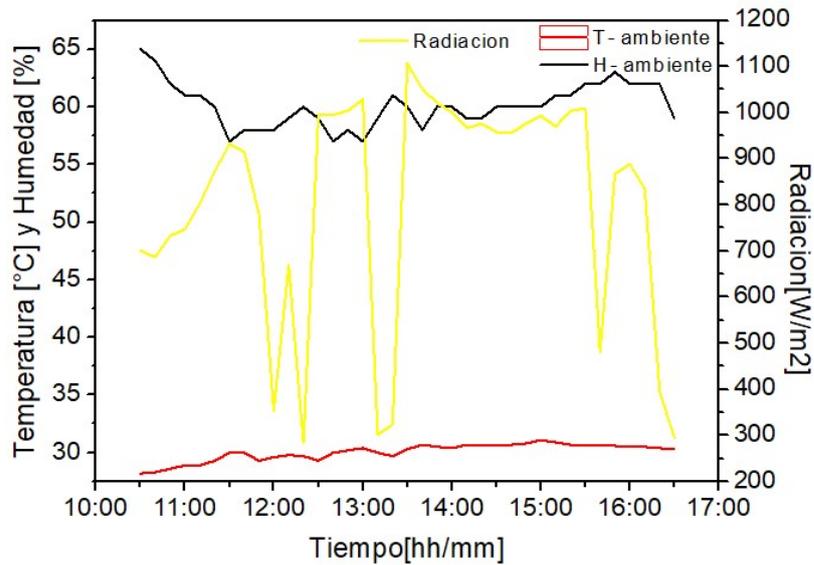


Figura 4.15 Condiciones ambientales de temperatura, humedad y radiación solar, para el 31 de marzo del 2019.

Se realizó un análisis con producto de café, durante 4 horas promedio, desde las 10:40 am a 13:50 pm, como se observa en la Figura 4.16, se analizó la variación de la temperatura y humedad relativa en el interior de la cámara de secado, teniendo como humedad inicial del producto un 70% y una temperatura de la cámara de 35°C, los subsistemas de calentamiento de aire **colector A** alcanzó picos de temperaturas de 110°C (*línea azul*) y el **colector B** (*línea verde*) de 125°C, el sistema auxiliar de leña alcanzo una temperatura de 105°C, en los primeros 10 *minutos*, se tomó en cuenta las condiciones ambientales descritas por la estación meteorológica del IIIER.

Como se observa en la Figura 4.16, cada el subsistema de calentamiento de aire **colector A** (*línea azul*) alcanzó temperaturas estables de 85°C y el **colector B** (*línea verde*) a temperaturas de 110°C promedio, pasando por el subsistema biomásico auxiliar de leña con una temperatura de 95°C, cabe mencionar que el subsistema de calentamiento biomásico no estuvo encendido, solo se tomó la lectura del sensor integrado, para monitorear su temperatura.

En la cámara de secado en la primera hora, la temperatura promedio llegó a 45°C y descendió su humedad a un 35 %, volviendo a incrementar su humedad debido a la inyección de aire caliente, alrededor de la 12:40 pm, la cámara logró alcanzar la temperatura deseada de 55 °C, la cual fue buena durante hora y media, la humedad dentro de la cámara aumento a las 12:50 pm a un 30 %, debido a que se abrió la cámara de secado, descendiendo en la siguiente media hora hasta un 12%.

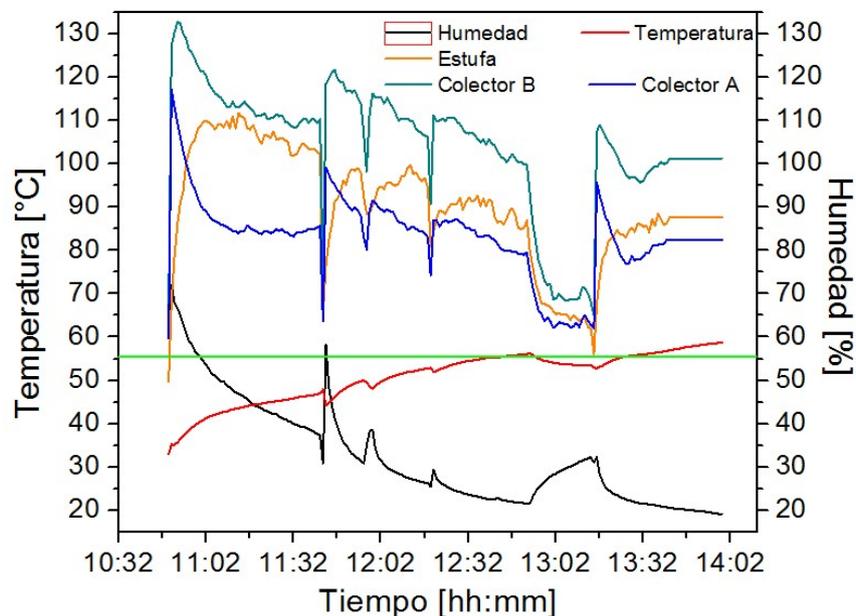


Figura 4.16 Variación de las temperaturas y humedad del aire al interior de la cámara de secado, como de los subsistemas de calentamiento con producto.

Para esta evaluación, el soplador de aire estuvo encendido tiempos que dependieron de la temperatura programada por el SAC, ingresando una temperatura de la cámara de secado inicial de 55°C con una humedad final de 12% para el proceso final. Donde se analizó que la temperatura llegó a los 55°C con una humedad del 20%, en un tiempo de 3 horas, lo cual fue muy óptimo, para luego bajar un poco más su humedad de equilibrio a un 12%, lo cual es ideal para el secado del grano café.

En la Figura 2.17, se analizó la variación de la humedad de la masa de café con humedad de un 60 % durante las primeras 2 horas, hasta llegar a una humedad de 12%, de acorde a las condiciones establecidas por las térmobalanza y el SAC.

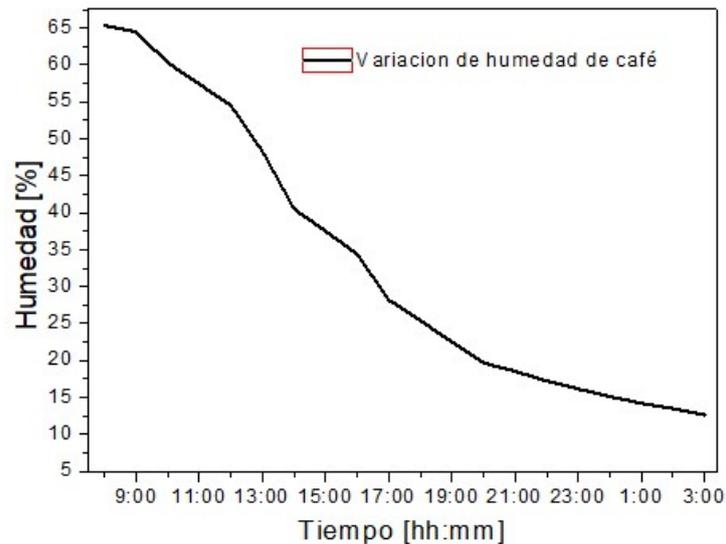


Figura 4.17 Variación de la humedad del café de 65 a 12 %.

En la Figura 4.18, se analizó la curva de variación de la humedad de los 275 kg de masa de café (línea roja), donde se observa la curva de variación de humedad de 20 kg, en las primeras 2 horas y posteriormente 75 kg en las siguientes 4 horas, la pendiente de secado de acuerdo a las muestras sacadas y evaluadas por la térmobalanza y el SAC.

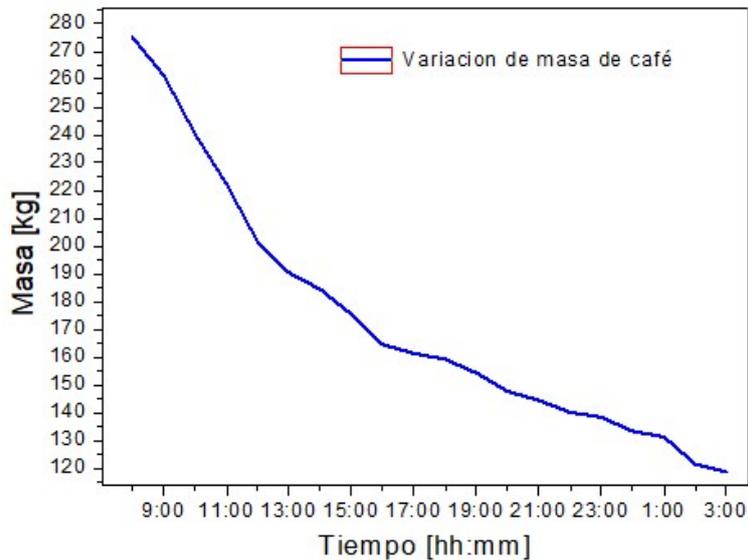


Figura 4.18 Variación de la masa de café de 275 a 120 kg.

Como resultado final con las gráficas 4.17 y 4.18 se puede comprobar variación de la humedad como la curva de pérdida de masa de 275 kg de café, teniendo una duración de tiempo de 16 horas, llegando a su humedad de equilibrio de un 12%, obteniendo una variación del deshidratado del producto del grano mediante las ecuaciones 3.3.

También se corroboró todo el sistema mecánico, como eléctrico y térmico de todo el dispositivo SSBRA, observando un buen comportamiento en el funcionamiento de los mecanismos de velocidad, como de la caja de control eléctrico y la interacción entre sus actuadores del software como del circuito electrónicos.

5.1- Conclusiones

1.- La cámara rotatoria tiene un volumen de **1.1 m³**, de los cuales **0.44 m³** son de producto a secar, que equivale a un **40 %** de su volumen total, esto representan **275 kg de café**, aproximadamente 5 costales de café de **55 kg**.

1.1- La cámara de secado logro alcanzar temperaturas entre **55 a 60 °C** lo que es ideal para el secado de este grano.

2.- El subsistema de calentamiento de aire solar, tiene un área de captación efectiva de **9.18 m²**, equivalente a **33 tubos** evacuados al vacío, y para tener una mejor absorción de la energía solar, se dimensiono con **40 tubos**, construyeron así 2 colectores de **5.55 m²**, donde el **colector A** alcanzo temperaturas máximas entre **90 a 120°C** y el **colector B** entre **100 a 125°C**.

3.-. El subsistema biomásico auxiliar de leña, logro sustentar la temperatura del aire dentro de la cámara de secado alcanzando temperaturas promedias entre 115 y 130 °C, esto se logra manteniendo un suministro de leña contante durante 3 horas de 10 kg.

4.- El diseño de la etapa de potencia para el subsistema de transmisión mecánico, logro reducir la velocidad del motor de **1735 RPM** a **5 RPM**, lo cual hace gira la cámara rotatoria lentamente y teniendo así también un control para su frenado del motor.

5.- El subsistema de automatizado de control, fue bueno, logra reducir velocidad de arranque del motor, manteniendo el giro deseado a **(5 RPM)**, para tener secado homogéneo de los granos.

5.1- El sistema de adquisición de datos del **SAC**, logro guardar la información de las evaluaciones realizadas de los parámetros pre-establecidos.

5.2.- El análisis de la prueba al vacío ayudó a conocer el comportamiento térmico de todo el sistema.

5.3.- La prueba con carga, demostró la posibilidad de que el sistema desarrollado pueda secar la cantidad de **275 kg** de café, en 16 horas, con una humedad entre el **12 %**.

TRABAJOS FUTUROS

- Realizar estudios organolépticos del producto deshidratado en el secador solar rotatorio.
- Implementar un sistema de bluetooth para la comunicación y mejor monitoreo.
- Realizar una simulación en softwares especializados con el cual se pueda describir el comportamiento del fluido en el colector solar y en la cámara de secado, así como en los ductos de acoplamiento del sistema.
- Hacer un estudio costo beneficio.
- Hacer un manual de operación.
- Mejorar el sistema automatizado de control, con una tarjeta de control de mejor protección para descargas o fallas eléctricas.

PRODUCTIVIDAD

- Se ha trabajado con la escritura de una patente del modelo de secador rotatorio para granos con un especialista en el tema, lo cual está en proceso de revisión final.
- Se obtuvo el certificado de asistencia al International Materials Research Congress in Cancún en agosto 2019.

The image shows two documents. On the left is a patent application form from the Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). The form includes fields for the format number (IMPI-00-009), the date of publication (24/05/2018), and general data of the applicant (Oscar Armando Conde Díaz). It also features a stamp from the Secretaría de Economía, Delegación Federal del Estado de Chiapas, dated 19 DIC 2018. On the right is a certificate of attendance from the Sociedad Mexicana de Materiales A.C., dated May 2nd, 2019, in Mexico City. The certificate acknowledges the contribution of Oscar Armando Conde Díaz to the symposium "Materials and Technologies for Energy Conversion, Saving and Storage (MATECSS)" at the XXVIII International Materials Research Congress in Cancun, August 18-23, 2019.

Bibliografía

- [1] Van Puyvelde, D. R. (2009). Modelling the Hold Up of Lifters in Rotary Dryers. Chemical Engineering Research and Design, 87(2), 226–232

Anexos

Anexos 1 Tabla de propiedades del aire a la presión 1 atm

CENGL, Yunus A. y John M. CIMBALA, "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-15.

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

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

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-30607020-8.

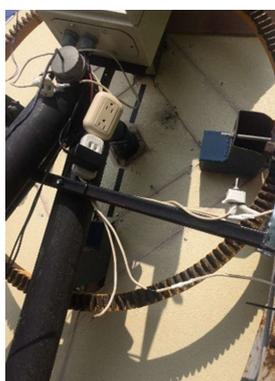
Anexo 2 Fotografías del proceso del proceso e introducción del producto de café en el SSBRA



Anexo 3 Fotografías del equipo de trabajo de la construcción del SSBRA



Anexo 4 Fotografías de la construcción del SSBRA



Anexo 5 Secador rotatorio solar- biomásico automatizado completo



Anexo 6 Manual para la limpieza del SSBRA

- 1 escoba de plástico de cerdas largas.
- 1 cepillo de plástico.
- 2 cubetas de plástico.
- 2 lienzos de un metro cada uno.
- 1 litro de Detergente líquido para lavar traste.
- 1 litro de hipoclorito de cloro.
- 1 recipiente de plástico mediano 1
- 1 recogedor de basura

Paso número uno: Una bitácora de limpieza Proceso: (Antes de limpiar se debe de checar que los equipos estén desconectados de la corriente eléctrica y todas las conexiones bien cerradas primer paso: con la escoba de cerdas largas suavemente se pasa por toda la superficie del deshidratador plus 2019 se recoge en la basura resultante para quitar todo el polvo y la basura que se pueda eliminar rápido.

Paso número dos: en una cubeta se coloca 4 litros de agua Con 20 mil de jabón para lavar.

Paso número tres: Con el cepillo de plástico se remoja en la cubeta con jabón y se escurre poco para lavar Con el mínimo de agua, este proceso se repite varias veces para cubrir bien toda la superficie del deshidratador plus 2019. Ya teniendo este paso se recoge el exceso del agua.

Paso número cuatro: ya que se lavó con jabón se pasan lo lienzos o trapos húmedos en toda la superficie varias veces lavando los trapos o lienzos.

Paso número cinco: en la otra cubeta se colocan 10 litros de agua con 10 mil de hipoclorito de sodio se remoja el otro lienzo o trapo con humedad necesaria y se pasa el lienzo varias veces en toda la superficie.

Paso número seis: se llena bitácora diaria con los horarios y se carga de producto.

Anexos 7 Programación del sistema automatizado de control del SSBRA

```
#include <Wire.h>

#include "RTClib.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "DHT.h"
#include <Max6675.h>
#include <Keypad.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
DHT dht;
RTC_DS3231 rtc;

#define SSpin 53
#define COLSI 20 // Columnas del LCD
#define ROWSI 4 // Filas del LCD
#define VELOCIDAD 300 // Velocidad a la que se mueve el texto
#define vel 80
Max6675 ts(4,5,6); //so, cs, sck
Max6675 tcA(24,25,26);
Max6675 tcB(27,28,29);

File dataFile;
const byte filas = 4;
const byte columnas = 4;
byte pinesF[filas] = {30,32,31,33};
byte pinesC[columnas] = {34,35,36,37};

char teclas[filas][columnas] = {

  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(teclas), pinesF, pinesC, filas, columnas);

char tecla;
float Tcamara;
float Thumedad;
float Testufa;
float TcolectorA;
float TcolectorB;

//
int RPM=A0;
int frenado=A6;
int led_indicador=A2;
int led_colectorB=A3;
int led_camara=A4; //led de señalamiento de SD y conexion de la camara de secado en funcion.
int led_frenado=A5; // led de advertencia cuando frene el secador.
```

```

int indicador=12;
int soplador=13;
int incrementar=8;
int decremento=7;
int inductivo=0;
int Posicionar=9;

void fun_Temp();
void asig_Temp();
void fun_Hum();
void asig_Humedad();

void fun_Soplador();
void fun_Activar();
void fun_Camara();
void fun_activarRPM();
void fun_posicionar();

void Activar_sistema();
void Frenar_sistema();
void Ajustar_sistema();
void Detener_RPM();

byte grado[8] = {
  0b00111,
  0b00101,
  0b00111,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000,
  0b00000
};

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init(); // Inicializar el LCD
  lcd.backlight(); //Encender la luz de fondo.
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" Programador Oconde");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" Secador Rotatorio");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print(" para Cafe - MMYSER");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print(" UNICACH - IIIER");
  lcd.createChar(1, grado);
  delay (5000);

  // setTime (1, 0, 0, 8, 11, 2019); // temporalizador
  // fecha=now(); //Obetnemos la fecha actual
  ts.setOffset(0);
  dht.setup(A1);
  Wire.begin();
  Serial.print("Iniciando SD card...");

```

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Iniciando SD card...");

pinMode (A2,OUTPUT); //LED INDICARDOR DE LA ESTUFA
pinMode (A3,OUTPUT); //LED INDICARDOR DE COLECTOR B
pinMode (A4,OUTPUT); //LED INDICARDOR DE LA CAMARA y SD
pinMode (A5,OUTPUT); //LED INDICARDOR DE FRENADO 12% DE HUMEDAD "LISTO"
pinMode (13,OUTPUT); // Soplador
pinMode (12,OUTPUT); //Indicador de la estufa
digitalWrite(13,HIGH);

pinMode(A6,INPUT);
pinMode (A0, INPUT); // Sensor Inductivo de frenado
pinMode(8, OUTPUT); //incremento de potencia
pinMode(7, OUTPUT); // decremento de potencia
{
Serial.println("Max6675 test"); //wait for Max Chip to stabilize
delay(1000);
}

if (!SD.begin(53)) { // Comprueba si la SD tiene comunicacion
Serial.println("Fallo comunicacion o no existe SD"); // Falla de comunicacion del SD
digitalWrite(led_camara, LOW); //Enciende un LED indicando falla en la comunicacion del SD
return;
}
digitalWrite(led_camara, HIGH); delay(5000); digitalWrite(led_camara, LOW); // Si no falla la
comunicacion del SD, el LED no enciende
Serial.println("SD Inicia"); // SD tiene comunicacion e inicia
Serial.print(""); //dataFile.println("");

//dataFile = SD.open("prueba1.txt", FILE_WRITE); // Deja que se pueda escribir en la SD

}

void loop() {
int cambio=1;
while(1){
if(cambio==1){
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("1)Temp 3)Sopl-Ind");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("2)Hum 4)Activar");

delay(2000);
Serial.println("1 Temp\n2 Hum\n3 Sop\n4 Activar");
cambio=0;
}
tecla = teclado.getKey(); //Lee la tecla
if (tecla!=0){
switch (tecla){
case '1': fun_Temp();delay(2000);cambio=1;break;
case '2': fun_Hum();delay(2000);cambio=1;break;
case '3': fun_Soplador();delay(2000);cambio=1;break;
case '4': fun_Activar();delay(2000);cambio=1;
}
}
}

```

```

    }
  }
} // termina la funcion void loop

void fun_Temp(){
char teclaT;
int salir=0,cambio2=1;
while(!salir){
if (cambio2==1){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Camara");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("A)Leer");
  lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("B)Asignar °C");
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("C)Regresar");
  Serial.println("A) Leer");
  Serial.println("B) Asignar °C");
  Serial.println("C) Regresar");
  cambio2=0;
}
teclaT=teclado.getKey();
if (teclaT != 0){
  switch (teclaT){
    case 'A': Tcamara = dht.getTemperature();Serial.print("Leyendo
Temp");Serial.println(Tcamara);
              lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Leyendo Temperatura"); digitalWrite
(led_camara,HIGH);digitalWrite (led_frenado,HIGH);
              lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.print("Cam ");lcd.write(1); lcd.print("C");
              lcd.setCursor(8, 1); lcd.print(Testufa = ts.getCelsius());lcd.print("Est");lcd.write(1);
lcd.print("C"); digitalWrite (led_indicador,HIGH);
              lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(TcolectorA = tcA.getCelsius());lcd.print("C-A
");lcd.write(1); lcd.print("C");
              lcd.setCursor(8, 2); lcd.print(TcolectorB = tcB.getCelsius());lcd.print("C-
B");lcd.write(1); lcd.print("C");
              digitalWrite (led_colectorB,HIGH); delay(10000);
digitalWrite(led_indicador,LOW);digitalWrite(led_colectorB,LOW);
              digitalWrite (led_camara,LOW); digitalWrite (led_frenado,LOW);cambio2=1;break;
    case 'B': asig_Temp();delay(2000);cambio2=1;break;
    case 'C': Serial.println("Regresando ...");
              lcd.clear(); lcd.setCursor (0,1);lcd.print ("Regrsando...");delay(2000);salir=1;break;
  }
}
}
}

void asig_Temp(){
char teclaTv;
int salir=0,cambio3=1;
while(!salir){
if (cambio3==1){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Asignar Temperatura");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("(1) 53 4) 56");
  lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("(2) 54 5) 57");
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("(3) 55 C) salir");
  Serial.println("(1) 53 4) 56");
}
}
}
}

```

```

Serial.println("2) 54 5) 57");
Serial.println("3) 55 C) Salir");
cambio3=0;
}
teclaTv=teclado.getKey();
if (teclaTv != 0){
switch (teclaTv){
case '1': Serial.println("Asignando: 53");Tcamara=53;
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Asignada:");
          lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
lcd.print("C");delay(2000);cambio3=1;break;

case '2': Serial.println("Asignando: 54");Tcamara=54;
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Asignada");
          lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
lcd.print("C");delay(2000);cambio3=1;break;

case '3': Serial.println("Asignando: 55");Tcamara=55;
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Asignada");
          lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
lcd.print("C");delay(2000);cambio3=1;break;

case '4': Serial.println("Asignando: 56");Tcamara=56;
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Asignada");
          lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
lcd.print("C");delay(2000);cambio3=1;break;

case '5': Serial.println("Asignando: 57");Tcamara=57;
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temperatura Asignada");
          lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
lcd.print("C");delay(2000);cambio3=1;break;

case 'C': Serial.println("Saliendo AsigTemp...");lcd.clear(); lcd.setCursor(0,1);
          lcd.print("Saliendo");delay(2000);salir=1;break;
default: Serial.println("No válido");
          lcd.clear(); lcd.setCursor(0,1);lcd.print ("No Valido");delay(2000);cambio3=1;
}
}
}

}
void fun_Hum(){
char teclaH;
int salir=0,cambio4=1;
while(!salir){
if (cambio4==1){
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Camara");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("A)Leer");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("A)Asignar H%");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("B)Regresar");
Serial.println("A) Leer");
Serial.println("A) Asignar H%");
Serial.println("B) Regresar");
cambio4=0;
}
}
}

```

```

}
teclaH=teclado.getKey();
if (teclaH != 0){
  switch (teclaH){
    case 'A':  Thumedad= dht.getHumidity();Serial.print("Leyendo
humedad");Serial.println(Thumedad);
              lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Leyendo Humedad");
              lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Thumedad);lcd.print("
%");delay(2000);cambio4=1;break;
    case 'B':  asig_Humedad();delay(2000);cambio4=1;break;
    case 'C':  Serial.println("Regresando ...");
              lcd.clear();lcd.setCursor (0,1);lcd.print ("Saliendo");delay(2000);salir=1;break;
  }
}
}
}
}
void asig_Humedad(){
char teclaHv;
int salir=0,cambio4=1;
while(!salir){
  if (cambio4==1){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Asignar Humedad");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("1) 8%  3) 11%");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("2) 9%  4) 12%");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("3) 10%  C) salir");
    Serial.println("1) 8%  4) 11%");
    Serial.println("2) 9%  5) 12%");
    Serial.println("3) 10%  C) salir");
    cambio4=0;
  }
  teclaHv=teclado.getKey();
  if (teclaHv != 0){
    switch (teclaHv){
      case '1':  Serial.println("Asignando: 8%");Tcamara=50;
                lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Asignada:");
                lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
                lcd.print("C");delay(2000);cambio4=1;break;

      case '2':  Serial.println("Asignando: 9%");Tcamara=51;
                lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Asignada:");
                lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
                lcd.print("C");delay(2000);cambio4=1;break;

      case '3':  Serial.println("Asignando: 10%");Tcamara=52;
                lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Asignada:");
                lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
                lcd.print("C");delay(2000);cambio4=1;break;

      case '4':  Serial.println("Asignando: 11%");Tcamara=53;
                lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Asignada:");
                lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(Tcamara);lcd.write(1);
                lcd.print("C");delay(2000);cambio4=1;break;

      case '5':  Serial.println("Asignando: 12%");Tcamara=54;
                lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Humedad Asignada:");

```



```

        Serial.println("A) Activar RPM");
        Serial.println("B) Fun-Camara");
        Serial.println("C) Posicionar");
        Serial.println("D) Regresar");
        cambio8=0;
    }

    teclaA=teclado.getKey();
    if (teclaA != 0){
        switch (teclaA){
            case 'A': fun_activarRPM(); delay(2000);cambio8=1;break;
            case 'B': fun_Camara(); delay(2000); cambio8=1; break;
            case 'C': fun_posicionar();delay(2000); cambio8=1; break;
            case 'D': Serial.println("Regresando ...");
                    lcd.clear(); lcd.setCursor (0,1);lcd.print ("Saliendo");
                    delay(2000);salir=1;break;

        }
    }
} // Termina el bucle While
}

void fun_activarRPM(){
    int x;
    x=0;

    lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Aumentando RPM");
    Serial.println("Aumentando RPM");

    while(x<1000){

        digitalWrite (8, HIGH);
        delay(40);
        digitalWrite (8, LOW);
        delay(40);
        x++;

    }

} // terminar void fun-activarRPM

void fun_Camara(){
    int subiendo=0;
    char teclaP;
    int salir=0, cambio10=1;
    String annio,mes,dia;
    String NombreArc;
    char NomF [15];
    unsigned tamaño=50;

    while (cambio10==1){
        lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("A)Desactivar RPM"); delay(2000);

        teclaP=teclado.getKey();
        if (teclaP != 0){
            switch (teclaP){

```

```

        case 'A': Detener_RPM(); delay(2000);cambio10=0;break;
    }
}
else {
Tcamara = dht.getTemperature();Serial.print("Leyendo Temp");Serial.println(Tcamara);
Thumedad= dht.getHumidity();Serial.print("Leyendo humedad");Serial.println(Thumedad);
delay(2000);

//while (Tcamara<52){
if (Tcamara<52){
subiendo=1;
TcolectorA = tcA.getCelsius(); digitalWrite (led_indicador,HIGH);
TcolectorB = tcB.getCelsius(); digitalWrite (led_colectorB,HIGH);

if ((TcolectorA+TcolectorB)>80){

digitalWrite(13,LOW); lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Inyectando aire");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Colectores");
}
else {
digitalWrite (12,HIGH); digitalWrite (13,LOW) ;
lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Inyectando aire"); lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Indicador");
}
Tcamara = dht.getTemperature();Serial.print("Leyendo Temp");Serial.println(Tcamara);
}
//while(Tcamara>57){
else if (Tcamara>57){
subiendo=0;
Tcamara = dht.getTemperature();Serial.print("Leyendo Temp");Serial.println(Tcamara);
digitalWrite (led_camara,HIGH);
}
else {
if (subiendo==0){
digitalWrite (13,HIGH); digitalWrite (12,LOW);

lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("apagando aire");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Apagado");
}
}
}

DateTime now = rtc.now();
año=(String)(now.year());
mes=(String)(now.month());
dia=(String)(now.day());

NombreArc.remove(0);
NombreArc.concat(mes);
NombreArc.concat(dia);
NombreArc.concat(".csv");
NombreArc.toCharArray(NomF, tamaño);
Serial.println(año);
Serial.println("-.-");

```

```

Serial.println(NomF);
dataFile = SD.open(NomF, FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    DateTime now = rtc.now();

    Serial.println("entra");
    dataFile.print(now.hour());
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(now.minute());
    dataFile.print(",");
    dataFile.print( Thumedad);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print( Tcamara);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print( Testufa);
    dataFile.print(",");
    dataFile.print( TcolectorA);
    dataFile.print(",");
    dataFile.println( TcolectorB);

    dataFile.close();
    Serial.println ("dato guardado");
}
else{
    Serial.println("error de guardado.txt");
    //return;
}
}
} // salir de la funcion camara

void Detener_RPM(){
    int x;
    x=0;

    lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Disminuir RPM");
    Serial.println("Disminuir RPM");

    while(x<1000){

        digitalWrite (7, HIGH);
        delay(40);
        digitalWrite (7, LOW);
        delay(40);
        x++;

    }
}
void fun_posicionar(){

    int salir=0, cambio11=1;
    //inductivo = analogRead(A6);

    lcd.clear(); lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Posicionar puerta");
    Serial.println("Posicionar puerta");
}

```

```
while(salir==0){
  inductivo = analogRead(A6);
  if (inductivo < 170){
    salir=1;
    digitalWrite(9,LOW);
  }
  else {
    digitalWrite(9,HIGH);
  }
}
}
```