



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES
DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
EN ENERGÍAS RENOVABLES**

TESIS

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y
EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR
ROTATORIO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS
ENERGÉTICOS RENOVABLES**

PRESENTA:

WEIMAR ALBERTO GRAJALES MORALES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ROILAN IGLESIAS DÍAZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Mayo de 2019



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
17 de mayo de 2019
Oficio No. DIP/0323/2019

C. Weimar Alberto Grajales Morales
Candidato al Grado de Maestro en Materiales
y Sistemas Energéticos Renovables UNICACH
P r e s e n t e

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la **opinión favorable** de la Comisión Revisora que analizó su trabajo terminal denominado **"Diseño, construcción y evaluación de un secador solar rotatorio"**, y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión del documento** mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que Usted sustentará para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

"Por la Cultura de mi Raza"


Dra. Magnolia Solís López
Directora

C.c.p. Expediente
*MSL/rags



Ciudad Universitaria. Lib. Norte Poniente núm. 1150
Colonia Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
C.P. 29039 Tel: (01 961) 61 70 440 Ext. 4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo cariño a mi amada familia:

Weimar, Reyna, Azucena y Carolina.

“Hay una fuerza extremadamente poderosa para la que hasta ahora la ciencia no ha encontrado una explicación formal. Esa fuerza es el amor.”

(Albert Einstein)



Agradecimiento

A mis padres Reyna y Weimar por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me forjaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron para alcanzar mis anhelos.

A mis hermanas Azucena y Carolina por el apoyo y las palabras de aliento que siempre me brindaron para seguir adelante y seguir perseverante y cumplir con mis metas.

Gracias al Dr. Roilan Iglesias Díaz por la motivación, colaboración y su tiempo ofrecido para la elaboración de esta tesis. Así como también un agradecimiento especial a todo el cuerpo académico que conforma el IIIER, por su digna labor y le doy mi reconocimiento por fomentar la educación de generación en generación, inculcando valores y sembrando el conocimiento.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados, Josef, Luis, Darwin, Didier, Koller, Giselle, Kike, Rubén, Efraín, Jamayote, Jhoana y Exal, quienes sin esperar nada a cambio compartieran su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante el transcurso de mi maestría estuvieron a mi lado apoyándome.

Asimismo, mi más profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido durante todo el

proceso de formación profesional y alcanzar el grado de Maestro en
Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.



Resumen

El presente trabajo de tesis describe el diseño, la construcción y la evaluación, de un prototipo de secador solar rotatorio para el deshidratado de granos de café. El propósito principal de este trabajo de investigación fue el desarrollo de un prototipo de secador solar rotatorio el cual utilice la energía solar térmica de una forma eficiente, para la obtención de granos deshidratados de café, además se logren reducir los tiempos de secado y con esto aportar una mejora en la técnica de secado del café. El diseño de este prototipo fue basado en tres características principales: i) El área de captación solar donde se emplearon tubos al vacío, ii) Una cámara de secado capaz de soportar 50 kg de café pergamino y iii) Emplear un mecanismo autónomo durante el proceso de secado. Al realizar la evaluación del prototipo se comprobó que: el colector solar puede alcanzar una temperatura promedio de 85.25 °C, el sistema de control de humedad y temperatura puede mantener la humedad relativa del aire al interior de la cámara de secado por debajo del 90 % y la temperatura del aire en un rango de entre 40 °C y 55 °C durante las operaciones de secado. Se comprobó la efectividad del prototipo con muestras de café de la variedad catimor, logrando reducir su contenido de humedad hasta un 7.16 %, además se redujeron los tiempos de secado hasta un 45.46 %, comparado con el método tradicional de secado en plazoletas. Este prototipo nos brinda información valiosa, que puede ser aplicada en trabajos futuros para escalamiento de este tipo de tecnologías o para su implementación en distintos procesos de secado solar.

Palabras clave: secado solar, secador rotatorio, tubos al vacío, café pergamino.

Abstract

This thesis work describes the design, construction and evaluation, of a solar dryer prototype for coffee dehydration. The main purpose of this research work was based on the obtaining of a rotary solar dryer prototype which uses solar thermal energy in an efficient way, to obtain dehydrated coffee beans. This also allowed to reduce the drying time and contributed to improve the technique for coffee drying. The design of this prototype was based on the main features: i) Construction of the solar collection area using vacuum tubes, ii) A dryer chamber capable of supporting 50 kg of parchment coffee and iii) Use an autonomous mechanism during the drying process. When carrying out the evaluation of the prototype, it was proved that: the solar collector can reach an average temperature of 85.25 ° C, the humidity and temperature control system can maintain the relative humidity of the air inside the drying chamber below 90 % and the air temperature in a range of 40 °C and 55 °C during drying operations. The efficiency of the prototype was verified with samples of coffee of the variety catimor, reducing its moisture content to 7.16%, in addition, the drying times were reduced up to 45.46%, comparing with the traditional drying method. This prototype provides us with valuable information, which can be applied in future works for the scaling of this type of technologies or for its implementation in different solar drying processes.

Keywords: solar drying, rotary solar dryer, vacuum tubes, parchment coffee.



Índice general

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XIV
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Contextualización	2
1.3 Antecedentes	4
1.4 Planteamiento del problema	16
1.5 Objetivos e Hipótesis	17
1.5.1 Objetivo General	17
1.5.2 Objetivos específicos	17
1.5.3 Hipótesis	18

1.6	Justificación	19
1.7	Conclusiones	20
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO		22
2.1	Teoría del secado	22
2.1.1	Técnicas de eliminación de agua en productos alimenticios	23
2.1.2	Importancia del secado solar en los países en desarrollo	25
2.1.3	Contenido de humedad	27
2.1.4	Curva de secado	29
2.1.5	Actividad del agua α_w	30
2.2	Propiedades psicrométricas del aire	31
2.2.1	Composición del aire seco	31
2.2.2	Constante particular del aire seco	32
2.2.3	Volumen específico del aire seco	32
2.2.4	Calor específico del aire seco	33
2.3	Propiedades del vapor de agua	33
2.3.1	Constante particular del vapor de agua	33
2.3.2	Volumen específico del vapor de agua	33
2.3.3	Calor específico del vapor de agua	34
2.3.4	Entalpía del vapor de agua	34
2.3.5	Entropía del vapor de agua	35
2.3.6	Humedad específica	36
2.3.7	Humedad relativa	37
2.3.8	Humedad absoluta	38
2.4	Clasificación de los secadores solares	38
2.4.1	Secadores por convección	39
2.4.2	Secadores por conducción	39
2.4.3	Secadores por radiación	40



2.5	Los granos	41
2.5.1	Partes del grano	41
2.5.2	Características y propiedades físicas de los granos	43
2.5.3	Humedad en los granos	45
2.5.4	Secado del grano	48
2.6	Diseño mecánico de secadores solares rotatorios	51
2.6.1	Detalle del proceso de secado	51
2.6.2	Dimensionamiento de la cámara de secado	52
2.6.3	Selección del espesor del cilindro	53
2.6.4	Diseño energético	54
2.6.5	Selección del motorreductor para rotación del cilindro	59
2.7	Conclusiones	61
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		64
3.1	Introducción	64
3.2	Sitio de experimentación	64
3.3	Diseño del dispositivo	65
3.3.1	Revisión bibliográfica	65
3.3.2	Parámetros de diseño	66
3.4	Principios de construcción del secador solar rotatorio	75
3.4.1	Maquinado del sistema	76
3.4.2	Características generales del sistema	83
3.5	Metodología de evaluación del secador solar rotatorio	84
3.5.1	Prueba en vacío	85
3.5.2	Prueba con carga	86
3.5.3	Preparación del producto	87

3.9 Conclusión	87
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES	90
4.1 Introducción	90
4.2 Resultados del diseño del prototipo	91
4.3 Análisis de los resultados del proceso de construcción del prototipo	96
4.4 Análisis del comportamiento de la humedad relativa en el sistema de secado sin producto	98
4.5 Análisis del comportamiento de la humedad relativa en el sistema de secado con producto	100
4.6 Análisis de temperaturas del aire al interior del sistema de secado	102
4.7 Análisis del funcionamiento del sistema de control	106
4.8 Análisis de los tiempos de secado del grano de café mediante diferentes tecnologías	107
Conclusiones	108
Trabajos futuros	111
REFERENCIAS	113
ANEXOS	116
Anexo 1 Hoja técnica del motorreductor Dayton	116
Anexo 2 Tablas de las propiedades del aire a la presión de 1 atm	117
Anexo 3 Fotografías del proceso de despulpado y selección del producto	118



Índice de figuras

Figura 1. 1 Secador solar de tambor para café.	5
Figura 1. 2 Secador solar multipropósito.	7
Figura 1. 3 Secador solar rotatorio para secado de café.	7
Figura 1. 4 Esquemas de las partes del secador rotatorio.	8
Figura 1. 5 Secador rotatorio de bananos].	11
Figura 1. 6 Esquema de una planta recicladora a base de energía solar térmica.	13
Figura 1. 7 Imágenes originales y filtradas en el software ImageJ. a) Imagen original, b) Imagen filtrada.	14
Figura 1. 8 Ilustración de los elevadores investigados.	15
Figura 2. 1 Curva de secado por fases (I, II y III).	30
Figura 2. 2 Diagrama T-s del vapor de agua. Líneas isoentálpicas.	35
Figura 2. 3 Diagrama T-s del vapor de agua contenido en el aire húmedo. Estado del vapor de agua (1), estado de saturación a Tbs (2).	37
Figura 2. 4 Partes del grano.	41
Figura 2. 5 Partes y temperaturas del cilindro de secado.	56
Figura 2. 6 Circuito térmico del flujo de calor perdido.	57

Figura 2. 7 Ejemplo de un sistema motorreductor.	59
Figura 2. 8 volantes solidarios.	60
Figura 2. 9 Ubicación del producto al interior del secador.	61
Figura 3. 1 Apreciación del recubrimiento de poliuretano en la cámara de secado.	70
Figura 3. 2 Ejemplificación del torque de un motor.	73
Figura 3. 3 Ilustración de los elevadores investigados.	76
Figura 3. 4 Microcontrolador Arduino.	80
Figura 3. 5 Sensor de humedad y temperatura DTH22.	81
Figura 3. 6 Válvula solenoide Nc ½ de Arduino.	82
Figura 3. 7 Sistema motorreductor acoplado a la cámara de secado.	83
Figura 3. 8 estación meteorológica Vantage Pro 2.	85
Figura 3. 9 Balanza electrónica para medir humedad. Modelo VE-50-5	87
Figura 4. 1 Diagrama del sistema de control de humedad y temperatura.	93
Figura 4. 2 Diagrama de flujo del sistema de control de la humedad relativa al interior de la cámara de secado.	94
Figura 4. 3 Diagrama de flujo del sistema de control de la temperatura del aire al interior de la cámara de secado.	95
Figura 4. 4 Componentes principales del secador solar rotatorio. 1) Soplador de aire, 2) Colector solar, 3) Cámara de secado, 4) Extractor de aire, 5) Cámara rotatoria de secado, 6) Motorreductor.	96

Figura 4. 5 Construcción de la cámara rotatoria de secado.	97
Figura 4. 6 Construcción del sistema interno para el flujo forzado de aire del colector solar.	97
Figura 4. 7 Secador solar rotatorio ensamblado.	97
Figura 4. 8 Movimiento del aire en el interior del colector solar durante su calentamiento, con vista transversal.	102

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Datos diarios de insolación media horizontales y horas de sol que se dan para algunos países.	26
Tabla 2. 2 Composición del aire seco.	32
Tabla 3. 1 Radiación solar promedio incidente en una superficie horizontal (kWh/m ² /día).	65
Tabla 3. 2 Humedad relativa promedio (%).	65
Tabla 3. 3 Síntesis de estudio para la revisión bibliográfica.	66
Tabla 3. 4 Densidad de los granos frescos de café.	68
Tabla 3. 5 Características del contenedor metálico.	69
Tabla 3. 6 Información técnica (tubos de vidrio solar al vacío TYY-AA).	71
Tabla 3. 7 Detalles de los diferentes segmentos de los elevadores.	76
Tabla 3. 8 Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café.	79
Tabla 4. 1 Descripción de los parámetros de diseño.	92

Índice de gráficas

Gráfica 4. 1 Temperatura del aire al interior del colector solar, cámara de secado y ambiente durante la prueba en vacío.	99
Gráfica 4. 2 Variación de la humedad relativa del aire en la prueba en vacío en el colector solar, cámara de secado y ambiente.	99
Gráfica 4. 3 Variación de la humedad relativa del aire en el colector solar y cámara de secado empleando el lote 1.	101
Gráfica 4. 4 Variación de la humedad relativa del aire en el colector solar y cámara de secado empleando el lote 2.	101
Gráfica 4. 5 Radiación solar en el periodo del 05 al 07 de noviembre de 2018.	103
Gráfica 4. 6 Radiación solar en el periodo del 09 al 11 de noviembre de 2018.	103
Gráfica 4. 7 Temperaturas en el sistema de secado (Colector solar vs Cámara de secado con muestra 1).	105
Gráfica 4. 8 Temperaturas en el sistema de secado (Colector solar vs Cámara de secado con muestra 2).	105
Gráfica 4. 9 Curva de secado comparativa entre el secador solar rotatorio y el secado tradicional. (El tiempo es en horas sol).	107

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En este primer capítulo, se realiza la introducción de los conceptos generales sobre los que se fundamenta el presente trabajo titulado “Diseño, construcción y evaluación de un secador solar rotatorio”, proyecto que surge debido a la necesidad de mejorar los procesos en el secado de granos a través de dispositivos renovables, es por ello que dicho proyecto tiene el propósito de mejorar la calidad en los granos, reducir los tiempos de secado y al mismo tiempo incrementar el valor al producto final, por medio de una tecnología novedosa y amigable con el medio ambiente, basada en los aspectos y características de diseño reportadas hasta la actualidad, en general dichos antecedentes no reportan hasta la actualidad la utilización de tubos al vacío como área de captación solar en secadores solares rotatorios.

En resumen, dicho capítulo expone las generalidades de la tesis, abarcando la problemática que se pretende resolver, los objetivos que se cumplirán, los motivos por los que la tesis es realizada y los métodos que serán utilizados.

1.2 Contextualización

El secado es una de las técnicas más antiguas utilizadas para la conservación de alimentos desde los principios de la humanidad, ya que proporciona al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia (Fito, 2001). El secado se define como la remoción de humedad contenida en un material, debido a la transferencia simultánea de calor y masa (Heldman y Lund, 1992).

En la actualidad, del 10 al 40% de los productos cosechados nunca llegan al consumidor debido a la descomposición y la contaminación del producto, este comportamiento se presenta principalmente en los países en vías de desarrollo. El secado es un proceso de alto costo, el cual representa entre el 35 y 40% del costo total de producción. Entre los procesos de secado que se aplican en la actualidad se encuentran los métodos industriales de secado, el secado solar y la combinación de ambos como una manera de reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto. Debido a los altos costos de los secadores industriales, estos no se encuentran al alcance de la mayoría de los pequeños agricultores, es por ello que el empleo de energías alternativas renovables, de bajo costo y no contaminantes, incrementa la viabilidad económica del proceso de secado al reducir sus costos de aplicación (Bayona Roa, 2011).

La deshidratación de alimentos sigue vigente por dos principales razones, la primera es que existen productos que, si no se comercializan inmediatamente después de la cosecha, representan pérdidas para los productores; la segunda razón son las ventajas que se obtienen al llevar a cabo este proceso, como el fácil transporte (por el menor peso), la estabilidad microbiológica y fisicoquímica, facilitando de esta manera su almacenamiento y manipulación (Geankoplis, 1999).

Como ya se ha mencionado anteriormente, dicho proceso se puede llevar a cabo mediante el uso de energías renovables como lo es la energía solar, a dicho proceso se le conoce como secado solar¹, esta es una de las técnicas más utilizadas para el secado de alimentos, sin embargo, este es un proceso relativamente lento, en el cual pueden ocurrir pérdidas considerables en la calidad del producto, debido a condiciones climáticas adversas (lluvia, viento, humedad, polvo, etc.), infestación de insectos, reacciones enzimáticas, crecimiento de microorganismos y desarrollo de micotoxinas. Aunado a esto, el proceso requiere mucha mano de obra, mucho tiempo y grandes áreas de exposición. Con el desarrollo cultural e industrial, el secado mecánico artificial entró en práctica, sin embargo, dicho proceso emplea gran cantidad de energía proveniente de la combustión de combustibles fósiles, por lo que finalmente aumenta el costo del producto final. Debido a esto, el secado solar es la mejor alternativa como solución a todos los inconvenientes del secado mecánico artificial (Vijayavenkataraman, Iniyar, y Ranko, 2012).

Existen factores económicos, sociales, medioambientales y culturales que son relevantes dentro del diseño de las tecnologías de secado. Para los pequeños productores agrícolas solamente son significativas las actividades e inversiones que aumentan considerablemente sus ingresos, bien sea reduciendo directamente los costos o aumentando la productividad. Por lo tanto, a menos que los sistemas de secado solar ofrezcan beneficios excepcionalmente atractivos en comparación con el secado al aire libre u otros sistemas de secado, no será posible en la práctica mejorar su aceptación (Bayona Roa, 2011).

Es por ello, que el presente trabajo de investigación parte de esta situación y se centra en el desarrollo y la evaluación de un prototipo de secador solar rotatorio

¹ El secado solar, en general, se refiere a una técnica de secado, que utiliza el calor captado de la radiación solar para suministrar la energía térmica necesaria para el secado (C., M., & I., 1996).

para el secado de granos, el cual logre reducir las pérdidas postcosecha, aumentar la calidad de los productos e incrementar la eficiencia del proceso y con esto lograr una mayor aceptación por parte de los pequeños productores.

Para poder cumplir con estas expectativas, se pretende que dicho dispositivo opere únicamente mediante energías renovables; utilizando la tecnología de tubos al vacío, como superficie de captación solar, utilizados en los diseños de calentadores de agua existentes, esperando con esto la disminución del tiempo de secado y la protección del producto ante factores biológicos y climáticos contaminantes.

1.3 Antecedentes

En el secado solar de semillas y granos se utilizan diversas variantes, en dependencia de la cantidad de la cosecha y la calidad que se requiera conseguir como producto final, entre estas se destacan: el patio o la plataforma de secado, el secador de caja rotatoria, el secador tipo túnel, el secador de tambor rotatorio y el secador solar de chimenea con silo para granos, etc.

De todas las variantes, la que garantiza una mejor calidad a un costo relativo menor es la de tambor rotatorio. Este secador consiste en un tambor rotatorio que carga el material a secar (las semillas o granos), situado dentro de una nave transparente de plástico o vidrio, con un tambor pintado de color negro mate para que funja como área de captación solar. Los tambores suelen tener diferentes diseños en dependencia del material a secar (Boris y Luis, 2015).

En la actualidad existe poca información acerca de los secadores solares rotatorios, y de los existentes ninguno reporta la utilización la tecnología de tubos al vacío, como elemento principal de captación de energía térmica, a pesar de eso, la información existente de los secadores solares rotatorios

brinda un panorama más específico del funcionamiento de este tipo de tecnología, además permite conocer en lo que se ha trabajado y desarrollado a lo largo del tiempo y con esto analizar los pros y contras de este tipo de tecnologías. Por lo cual a continuación, se mencionan los trabajos relevantes de investigación que contribuirán al desarrollo del proyecto.

Uno de los trabajos más destacados en esa área lleva por nombre “Análisis Térmico Del Secador Solar De Tambor Rotatorio Para Granos”, desarrollado en el Centro de Investigaciones de Energía Solar, donde (Fonseca Fonseca et al., 2000), construyeron un secador solar de tambor rotatorio para granos, el cual está constituido por una estructura metálica en forma de paralelepípedo, a partir de perfiles angulares soldados entre sí. Posee doble cubierta de vidrio transparente colocadas en la parte superior a dos aguas y en los laterales flanco este y oeste. Está orientado en la dirección norte-sur, cerrado en ambos extremos con puertas metálicas aisladas térmicamente como se observa en la figura 1.1.



Figura 1. 1 Secador solar de tambor para café, [7].

El tambor, colocado en el interior de la cámara de captación solar, está formado por un doble cilindro metálico de chapa de acero perforada. Y el producto a secar es colocado en el espacio anular entre los dos cilindros. El tambor gira a

6 r/min a través de un mecanismo de motor reductor y transmisión por fricción, y se desplaza sobre rieles en el sentido longitudinal hacia adentro o fuera de la cámara de captación solar para las operaciones de carga, descarga o mantenimiento.

El principio de funcionamiento de este secador, se basa en el efecto invernadero en el cual, de todo el espectro de la radiación solar incidente, una parte atraviesa la doble cubierta de vidrio; de ella una fracción es absorbida por las superficies metálicas absorbedoras del tambor, las cuales emiten radiación infrarroja que no puede atravesar el vidrio y éste a su vez emite hacia las superficies absorbedoras, creándose una trampa térmica. La radiación absorbida por la chapa metálica se transfiere en forma de calor al aire contenido en de la cámara de captación solar y del espacio anular entre los dos cilindros, incrementándose la temperatura del fluido a lo largo del día solar.

El resultado del análisis térmico realizado a partir de los cálculos de los coeficientes de transferencia de calor en diferentes partes del equipo, donde se cuantificaron las pérdidas térmicas del secador solar de tambor rotatorio para granos, indica que las pérdidas de mayor cuantía son las que ocurren del tambor al piso ($5.55 \text{ W/ m}^2\text{K}$), y de éste a la tierra ($3.33 \text{ W/m}^2\text{K}$). La caracterización térmica del secador, indicó una correcta concepción en el diseño y mostró una distribución favorable de las áreas de captación y de pérdidas, por lo que es posible pronosticar un buen funcionamiento térmico en el secado de granos para las condiciones de diseño.

Un segundo trabajo, titulado “Secado De Café Pergamino En Secadores Solares Multipropósito Y De Tambor Rotatorio”, desarrollado en el centro de Centro de Investigaciones de Energía Solar, en Cuba, por (Abdala Rodríguez, et al., 2003), en el cual presentan resultados experimentales de ensayos de

secado de café pergamino en dos tipos de secadores solares: multipropósito (Figura 1.2) y de tambor rotatorio (Figura 1.3).



Figura 1. 2 Secador solar multipropósito, [8].

Los índices de calidad determinados experimentalmente, muestran que en base a las cualidades normadas que debe poseer el café pergamino cultivado en zonas bajas, la utilización de los equipos solares de secado (el secador solar de tambor rotatorio y el secador solar multipropósito) no han producido ningún efecto negativo en la calidad del grano seco. Por tanto, en base a este estudio, determinaron que el secado solar del café es factible, desde el punto de vista técnico, en cualquiera de las variantes tecnológicas ensayadas.

En el secador solar multipropósito es posible secar 12.12 kg/m^2 en 3 días efectivos de sol, equivalentes a 4.04 kg/m^2 por día, y en el secador solar de tambor rotatorio 14 kg/m^2 en 5 días efectivos, equivalentes a 2.9 kg/m^2 por día.

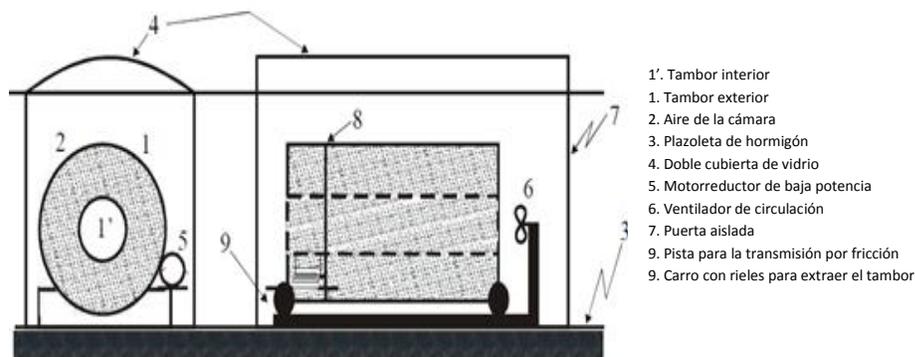


Figura 1. 3 Secador solar rotatorio para secado de café, [8].

Una interesante investigación que lleva por título “Modern solar grain dryer”, desarrollada en la facultad de ingeniería de la Universidad El-Minia, Egipto por (Tayeb, 1986), se centra en el desarrollo y evaluación de una unidad moderna para el secado de granos. Dicha unidad, es simplemente un secador rotatorio que utiliza la energía solar como fuente de calor (Figura 1.4).

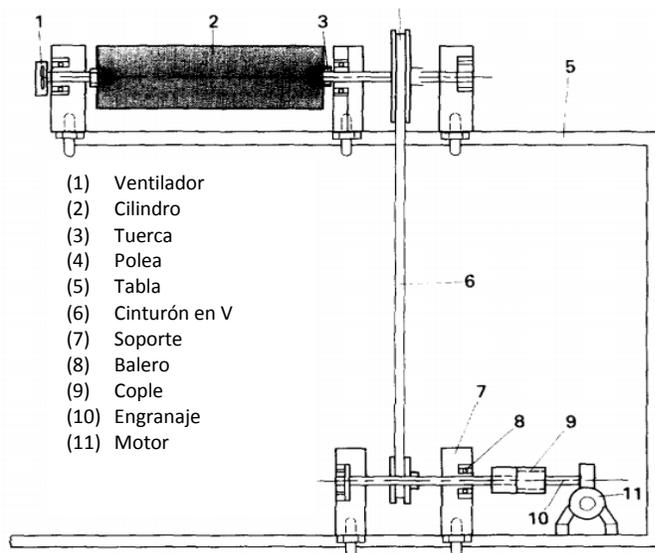


Figura 1. 4 Esquemas de las partes del secador rotatorio, [9].

Este secador, consiste en una envoltura cilíndrica giratoria, ligeramente inclinada hacia la salida. El aire húmedo entra en un extremo del cilindro, y el material seco descarga en el otro extremo. El cilindro tiene 1 m de largo y tiene un diámetro de 0,28 m, y está recubierto con una película delgada de una pintura negra especial para maximizar la energía absorbida de la radiación solar. De esta manera el cilindro actúa a la par como secador y colector solar. El aire entra por un extremo perforado, por la acción del ventilador de succión, se calienta por contacto con la envoltura metálica negra, efectuando así el

secado de los granos durante el trayecto en la envuelta y finalmente sale por el otro extremo perforado.

Los resultados de las pruebas de secado de maíz y cacahuets realizadas, demuestran que partiendo del contenido de humedad inicial de 54,3 y 22% respectivamente, se alcanzaron valores aproximados a 6,5 y 10 en un promedio de 5,30 y 3 h, respectivamente, utilizando un secador solar rotatorio solar.

(Yomayusa et al., 2015) del Programa de Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones Bogotá D.C, presentan en el trabajo que lleva por título “Construcción De Un Prototipo Secador Rotatorio Automatizado Para Café”, los diferentes cálculos realizados y materiales usados para el desarrollo y construcción de un prototipo de secador rotatorio, donde se proponen un diseño a escala industrial para el desarrollo de un secador de mayor capacidad.

A través de las diferentes pruebas y análisis realizados, y aplicando conocimientos de ingeniería en el campo agrícola a lo largo del desarrollo del proyecto, demostraron que es posible mejorar los diseños de secadores rotatorios actuales generando a su vez un desarrollo tecnológico aplicable en el área del secado del café, con el cual se brinde una mejor eficiencia frente al secado controlando. Con esto, factores importantes que influyen en el proceso de secado, podrán ser manipulados para la obtención de un producto deshidratado de buena calidad, generando un desarrollo tecnológico aplicable en el área del secado del café.

El trabajo que lleva por título, “Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio”, realizado por (Sper Berna y Torres Córdova, 2009), en el cual describen detalladamente la infraestructura y el diseño individual de

la gran mayoría de los equipos que lo conforman, así como también los procesos y parámetros utilizados.

Los resultados presentados en dicho documento, dan a conocer parámetros fundamentales útiles en el proceso de diseño de este tipo de secadores. Uno de estos parámetros es que el uso de una malla rotatoria durante el funcionamiento puede tender a deformarse, lo cual haría que el producto no realice el recorrido deseado dentro de ella y por ende este no logró secarse de manera uniforme. Para ello se debe rigidizar el sistema con el uso de varillas de acero inoxidable puestas en la parte exterior de la malla soldadas en los anillos de soporte. Además, recomiendan incluir una varilla a lo largo de la malla por cada elevador o aleta.

A pesar de esto, el secador rotatorio de malla (Figura 1.5) presenta un consumo energético menor con respecto a los secadores rotatorios tradicionales, debido un requerimiento más bajo de la potencia del motor. Esto se debe a que ya no se hace rotar todo un cilindro de plancha de acero, sino una malla que tiene casi 4 veces menos peso para unas mismas dimensiones dadas.

En dicho trabajo (Sper Berna & Torres Córdova, 2009), mencionan que, con el diseño de este secador se ha logrado un valor teórico del 52.5% aceptable, para una consideración de diseño preliminar. En donde, para 1 hora de operación, es necesario suministrar 57.15 kg/hora de Gas LP.

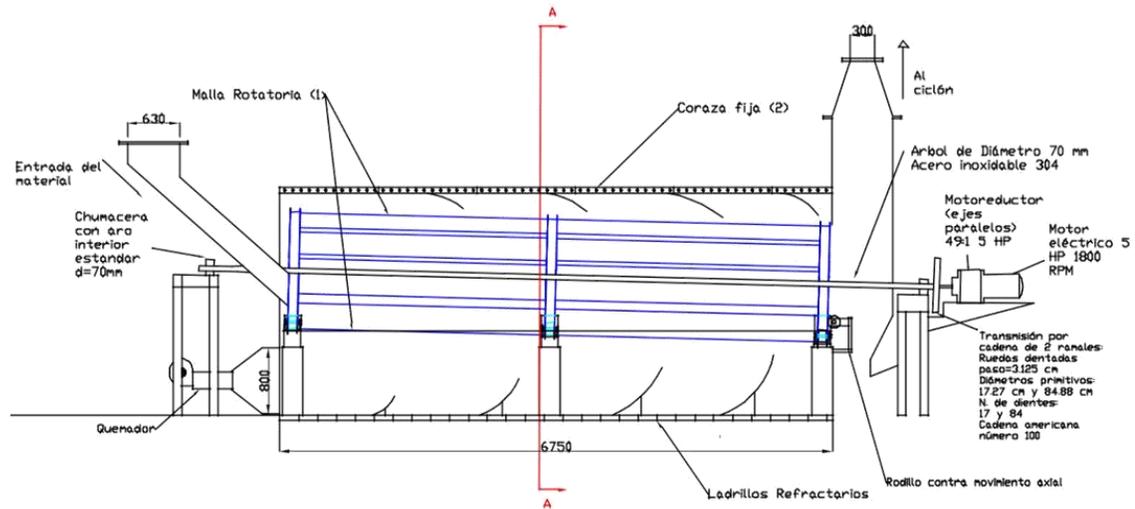


Figura 1. 5 Secador rotatorio de bananos, [11].

Uno de los trabajos que se ajusta pertinentemente al trabajo de investigación realizado, es el desarrollado por (Alonso et al., 2017), el cual lleva por título “Use of rotary kilns for solar thermal applications: Review of developed studies and analysis of their potential”. Donde se presenta una visión general del uso de secadores rotatorios en aplicaciones industriales de alta temperatura y aquellos aspectos relacionados con su adaptación a las tecnologías de concentración de energía solar. Además de esto, se dan a conocer los resultados obtenidos de los estudios de transferencia de calor realizados en hornos rotatorios solares, así como las metodologías de simulación empleadas y una descripción general de los prototipos analizados.

Entre los prototipos solares revisados por (Alonso et al., 2017), se presenta uno novedoso que fue diseñado y operado por los autores del presente trabajo. Donde incluyen una evaluación experimental del rendimiento rotativo, del cual pudieron determinar que las características principales que definen el rendimiento de los hornos rotatorios son, el tipo de movimiento de la cama, dado por el número de Froude Fr y el tiempo de residencia.

En esta revisión de trabajos numéricos y experimentales, se han identificado diferencias significativas entre los hornos rotatorios clásicos y solares, en donde la mayoría de los casos los prototipos de sacadores solares no dieron lugar a altas eficiencias y por ende los autores de los distintos trabajos analizados necesitaron aplicar diferentes estrategias para mejorarlos, lo que denota el grado de complejidad de la etapa de diseño en secadores solares rotatorios.

(Alonso et al., 2017) sugiere algunas recomendaciones para futuras investigaciones en la optimización de los diseños de secadores rotatorios solares, señalando que es necesario consultar el conocimiento disponible de los hornos rotatorios clásicos de la industria debido a que en el campo solar, los trabajos revisados no prestan especial atención al análisis y la definición del modo de movimiento y un esfuerzo adicional en tal dirección podría valer la pena para mejorar la condiciones de uniformidad de secado del producto, dando lugar a mejores resultados de eficiencia de la tecnología de los secadores solares rotatorios ya que esto sigue siendo el desafío esencial.

El Centro Aeroespacial alemán ha desarrollado un concepto de proceso para el reciclado de residuos sólidos y materiales de desecho a escala comercial y ha aplicado este concepto a la producción de aluminio reciclado utilizando energía solar térmica, el cual es presentado en el trabajo que lleva por título “Simulation model for the transient process behaviour of solar aluminium recycling in a rotary kiln”. En este contexto, (Alexopoulos et al., 2015) han desarrollado un modelo matemático para la simulación del comportamiento de un horno rotatorio calentado por energía solar, dicho modelo es utiliza las condiciones del límite solar, como la insolación intermitente y al menos un período de puesta en marcha por día, además es capaz de simular procesos híbridos y convencionalmente calentados con combustibles fósiles en hornos rotatorios. El modelo fue adaptado y validado mediante experimentos de reciclaje utilizando un horno rotatorio calentado por energía solar térmica.

Los resultados experimentales indicaron que hubo una similitud con los datos predichos por los cálculos transitorios. Es por ello que (Alexopoulos et al., 2015) toman esto como base y el modelo se aplicó para predecir un posible concepto de operación para una planta independiente operada exclusivamente con energía solar por medio de heliostatos² implementada en El Paso, Texas. El horno rotativo considerado (Figura 1.6) tiene una capacidad de aproximadamente 8 toneladas de chatarra, donde los cálculos predicen la factibilidad de fundir una carga durante un día desde la puesta en marcha. La eficiencia prevista asciende a 72% en un día con buena insolación.

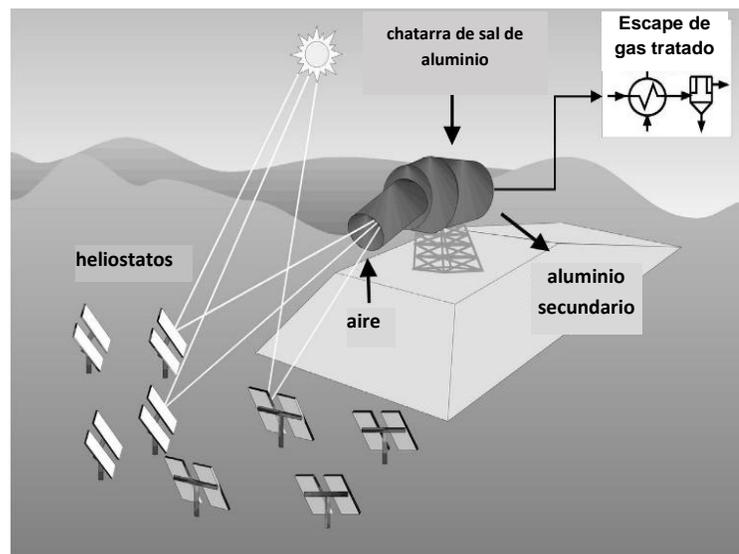


Figura 1. 6 Esquema de una planta recicladora a base de energía solar térmica, [13].

Los procesos de estimación de cargas en los secadores rotatorios son de gran importancia para llevar a cabo el correcto diseño de los dispositivos y en el artículo que lleva por título “Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers”, (Ajayi y Sheehan, 2012) se centran en detallar

² Los heliostatos (grandes espejos con sistemas de seguimiento solar) concentran la luz solar en un receptor central montado sobre una torre (Richter, Teske, y Short, 2009).

las técnicas de análisis de imágenes³, donde examinan las diferentes regiones de interés dentro del tambor las cuales utilizan para determinar el diseño de la carga en los secadores rotatorios.

El estudio realizado, demuestra que el análisis de imágenes es una herramienta útil para caracterizar la carga en secadores rotatorios. La técnica de análisis de imágenes automatizadas utilizó la mejora del contraste, el filtrado y el umbral para mejorar la calidad de la imagen y permitir que se procesen múltiples imágenes para cuantificar la cantidad de material dentro de los tramos de un tambor giratorio. Las imágenes procesadas se usaron para determinar la carga de diseño a través de diferentes enfoques, con la cual concluyeron que todos fueron razonablemente similares.

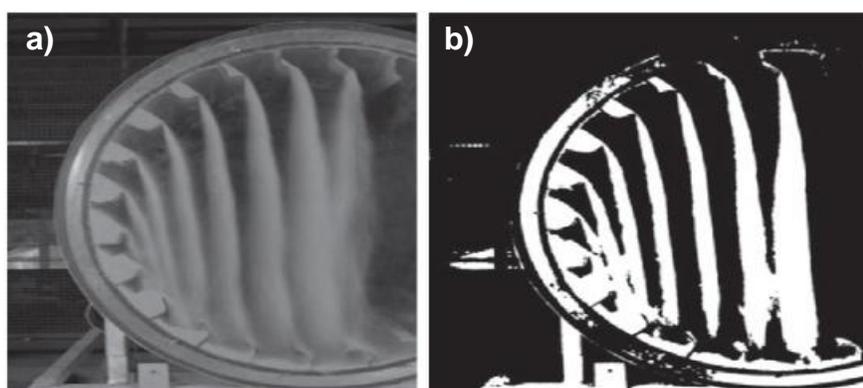


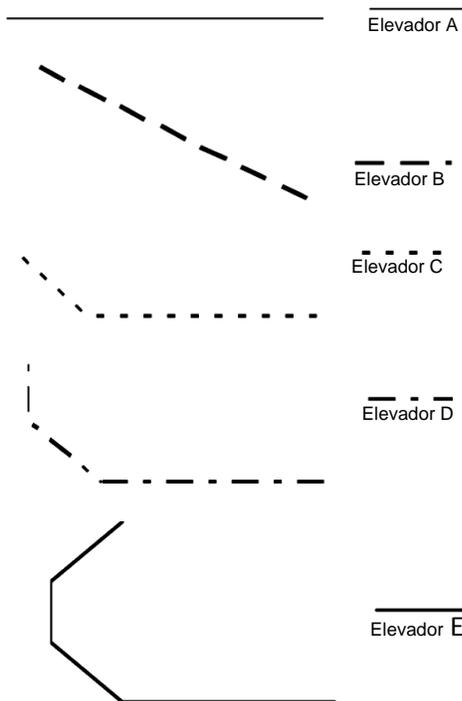
Figura 1. 7 Imágenes originales y filtradas en el software ImageJ.
a) Imagen original, b) Imagen filtrada [14].

El trabajo que lleva por título “Modelling the hold up of lifters in rotary dryers”, (Van Puyvelde, 2009a) presenta un nuevo modelo que calcula la cantidad de material que pueden soportar los levantadores durante la rotación y lo compara con diferentes geometrías de elevadores. Por lo tanto, dicho modelo ayuda a

³ El análisis de imágenes es el proceso de extraer información importante de imágenes; principalmente a partir de imágenes digitales mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales (Ajayi & Sheehan, 2012).

tener una mejor comprensión de la cantidad de material en los levantadores durante la rotación.

Esto a su vez puede permitir a los usuarios de secadores a modificar los diseños de sus secadores para optimizar la operación de secado. En dicho trabajo, (Van Puyvelde, 2009a) ilustra los diferentes perfiles de retención de cinco distintos elevadores en un secador rotativo de 1 m de radio (figura 1.7). Al comparar los resultados de la plataforma experimental a pequeña escala con los predichos por el modelo, se observó una similitud en ellos, además de esto (Van Puyvelde, 2009a) encontró que los levantadores más complejos tenían un rango de retención de material más alta y una tasa de material perdido generalmente menor que los simples levantadores perpendiculares. Esto dio como resultado una transferencia de calor mejorada del secador rotatorio en cascada. Sin embargo, la aplicación específica de la secadora debe ser considerada ya que esto puede dictar el tipo y rango de distribución. El modelo descrito en este documento puede utilizarse para desarrollar un elevador que mejor se adapte a esta distribución.



1.4 Planteamiento del problema

El secado de semillas y granos se ha convertido en una necesidad generalizada para aumentar la producción alimentaria. Para un secado de calidad es necesario que el grano se seque uniformemente y esto solamente se logra proporcionando un flujo uniforme de aire seco a través de los granos. Este es el principio de los grandes secadores industriales de granos (Boris y Luis, 2015).

En México y en el mundo se utilizan grandes cantidades de recursos energéticos en las operaciones de secado. Tradicionalmente el secado de café, maíz, frijol y diferentes granos en México, se ha logrado por procesos naturales (secado al aire libre). Sin embargo, por diferentes causas, el secado artificial ha sustituido en muchos casos al secado natural.

Las principales ventajas del secado artificial basado en consumo de combustibles fósiles, sobre el secado natural son las siguientes; la calidad del producto deshidratado es generalmente superior si se selecciona una buena tecnología del proceso; la velocidad de secado suele ser mucho mayor, disminuyendo considerablemente el tiempo de secado, lo que influye en la calidad y en el costo del producto. Sin embargo, también presentan grandes desventajas como: alto costo de la instalación y alto costo de producción ya que la mayoría de estos usan generalmente fuentes convencionales de energía para el calentamiento del aire o del producto.

Además de esto cabe mencionar que, en la actualidad, existe muy poca información acerca del secado artificial de granos, utilizando secadores solares

rotatorios. En general el secado artificial de granos es una técnica poco difundida en América Latina.

Es por ello que se desarrollara un prototipo de secador solar rotatorio, el cual opere únicamente mediante energías renovables, incorporando la tecnología de tubos al vacío como superficie de captación solar, que con base a la revisión de literatura indica que no ha sido implementada en secadores solares rotatorios. Esto con la finalidad de realizar los estudios correspondientes para poder determinar la factibilidad de este tipo de tecnología en el proceso de deshidratado de granos.

1.5 Objetivos e Hipótesis

1.5.1 Objetivo General

Diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de un secador solar rotatorio, con el propósito de mejorar la calidad en los granos, reducir los tiempos de secado y al mismo tiempo incrementar el valor al producto final, por medio de una tecnología novedosa y amigable con el medio ambiente.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Realizar el diseño del deshidratador solar rotatorio para granos.

1.1. Búsqueda bibliográfica de sistemas de secado solar rotatorio y selección de tecnología a utilizar.

- 1.2. Desarrollo de cálculos matemáticos para estimar los parámetros diseño del secador solar rotatorio.
 - 1.3. Realización del diseño del secador y la simulación en 3D del sistema de rotación del prototipo, utilizando el software de Diseño Asistido por Computadora SOLIDWORKS®.
2. Construir un secador solar rotatorio con base a los resultados del diseño.
 - 2.1. Realización del maquinado del sistema de rotación.
 - 2.2. Fabricación de las piezas necesarias secador.
 - 2.3. Ensamblaje de las piezas del secador.
3. Evaluación del desempeño del secador.
 - 3.1. Realización el estudio de cinética de secado, utilizando como productos (granos de café y cacahuate).
 - 3.2. Evaluación del funcionamiento del sistema del control de velocidad de rotación de la cámara de secado.
 - 3.3. Realización del procesamiento y análisis de datos obtenidos de las pruebas de cinética de secado en el producto y los de la evaluación de eficiencia del secador.

1.5.3 Hipótesis

- 1 Con el desarrollo de un sistema de secado solar rotatorio e implementando el uso de tubos al vacío como método de captación solar, se logrará obtener una alta calidad del grano seco, lo cual incrementará el valor del producto final.

- 2 La incorporación de tubos al vacío a un secador solar rotatorio como área de captación, logrará reducir los tiempos de secado y además estos satisfarán la energía requerida para realizar el proceso de deshidratado de granos.

1.6 Justificación

El desarrollo de este tema de investigación está basado en el hecho que ha causado gran interés y controversia, este es el agotamiento de recursos fósiles y las implicaciones ambientales asociadas a su uso en las operaciones de secado de granos, hecho que ha originado un gran interés y ha volcado la vista hacia el aprovechamiento de los recursos renovables, considerándola como la alternativa viable para satisfacer estas necesidades.

Dentro de las energías renovables, la energía solar térmica presenta gran potencial en los procesos de obtención de energía y calor, específicamente, en el desarrollo de procesos de deshidratación de alimentos. Es por ello, que el presente trabajo de investigación, tiene como finalidad analizar los inconvenientes presentados en los procesos de secado de granos en los cuales se utilizan fuentes de energías renovables, dicha investigación permitirá desarrollar un dispositivo de secador solar rotatorio, el cual contribuya al desarrollo tecnológico y mejore los procesos de deshidratado de granos, solventando con esto la necesidad generalizada para incrementar la producción alimentaria y además contribuya a la obtención de granos con alto grado alimenticio para su comercialización u almacenamiento.

Con esta tecnología se evitará generar gases de efecto invernadero ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), ya que no se consumirán hidrocarburos (gas, carbón, petróleo, etc.) en el proceso de secado.

1.7 Conclusiones

En el primer capítulo de esta Tesis, se plantea como propósito principal el diseño, construcción y evaluación de un secador solar rotatorio. En su origen, el secador a desarrollar se pretendía diseñar a partir de un calentador de agua existente, sin embargo, tras un estudio preliminar del tema, mediante un trabajo de recopilación de datos se decidió presentar diversas propuestas acerca del diseño y analizar cada una de ellas. A medida que se avanzaba en la investigación, se presentaron otras problemáticas que fueron paulatinamente incorporadas como parte importante de este trabajo. A pesar de eso, tras la investigación realizada, se sigue manteniendo la postura de que el desarrollo de un secador solar rotatorio y la utilización de tubos al vacío es una buena opción para el deshidratado de granos. Por ello los capítulos de este trabajo se han estructurado con los contenidos que se considera importante para conseguir el objetivo principal que es el de diseñar, construir y evaluar un secador solar rotatorio.

*“Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran
belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un
técnico: también es un niño colocado ante fenómenos
naturales que lo impresionan como un cuento de
hadas.”*

(Marie Curie)

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

2.1 Teoría del secado

El secado es uno de los métodos más comunes para preservar o conservar los alimentos. Este método consiste en reducir o disminuir el contenido de agua de un alimento determinado a un nivel en donde el producto pueda conservarse por periodos prolongados. Esto varía dependiendo del producto que se requiera secar y también de la temperatura (CER-UNI, 1998).

Se entiende por secado a la reducción del contenido de agua de un producto. El proceso se conoce como deshidratación. Para que esta deshidratación se lleve a cabo se necesita suministrar calor de evaporación y remover el aire húmedo del ambiente. En los secadores convencionales esta energía de evaporación es suministrada por un determinado combustible o electricidad. Aproximadamente, 1kWh para eliminar 1 kg de agua.

Hablar del secado solar es hacer mención del uso de la radiación solar como fuente de energía para el proceso de secado. Ahora bien, el secado solar puede ser de dos formas: uno es un secado solar indirecto en donde la radiación solar es captada por un colector por donde circula cierta cantidad de aire, este flujo de aire se calienta e ingresa a la cámara de secado en donde se encuentra el producto a ser secado. El aire caliente pasa el producto removiendo el contenido de humedad de la cámara.

Otra forma de secado es el secado directo, en este caso la radiación solar incide directamente por el producto a ser secado, adquiriendo así la energía de evaporación necesaria. Luego, la humedad formada en los alrededores del producto es removida por el aire tomado del exterior (CER-UNI, 1998).

2.1.1 Técnicas de eliminación de agua en productos alimenticios

La desecación puede llevarse a cabo por diferentes métodos, mecánicos y físico-químicos como los mencionados a continuación (Vargas & Arcelia, 2007).

2.1.1.1 Prensado

También llamado compresión, es una operación que tiene por finalidad separar un líquido de un sistema de dos fases sólido-líquido, comprimiendo el sistema en condiciones que permitan al líquido fluir y salir mientras el sólido queda retenido entre las superficies compresoras.

2.1.1.2 Centrifugación

Al aplicar a un material mojado una fuerza centrífuga suficientemente elevada, el líquido contenido en el material se desplaza en la dirección de la fuerza, produciendo así una separación del líquido y del sólido.

2.1.1.3 Vaporación superficial

Cuando un producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido en el aire. Se produce así una desecación. Este es el método más utilizado, también llamado deshidratación por aire caliente.

2.1.1.4 Ósmosis

Cuando un producto se sumerge en una disolución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (membrana celular). Este flujo se establece a causa de una diferencia de potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea.

2.1.1.5 Liofilización

En esta operación, el líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que los contiene por sublimación. De ahí que sea necesario partir del material congelado y trabajar en condiciones de vacío.

2.1.1.6 Absorción

La absorción es una operación aplicada a gases, en la que uno o varios componentes de una mezcla gaseosa se disuelven en un líquido. En el caso de la desecación, el componente que se solubiliza es el vapor que se quiere eliminar del gas en cuestión. Como ejemplo puede citarse la desecación de gases mediante ácido sulfúrico.

2.1.1.7 Adsorción

Es difícil una definición simple de adsorción por lo que nos limitaremos a dar un ejemplo: la eliminación del agua contenida en el aire mediante adsorbentes como el gel de sílice.

2.1.1.8 Congelación

Cuando se congela una sustancia que contiene un líquido, éste se separa paulatinamente en forma sólida produciendo una concentración del material que contenía disuelto o bien, cuando se encuentra en cantidades pequeñas, desecando el material.

2.1.2 Importancia del secado solar en los países en desarrollo

Debido a la falta de métodos de conservación adecuados y directos, el secado al aire libre es todavía un medio utilizado ampliamente para la conservación de los alimentos en la mayoría de los países en desarrollo. Esta práctica tradicional tiene desventajas inherentes:

- El daño a los cultivos por los roedores, aves y animales.
- La degradación a través de la exposición a la radiación directa del sol y la lluvia, las tormentas y la contaminación de rocío por la suciedad, el polvo, los escombros por el viento y la contaminación ambiental.
- La separación del grano de blanqueo y pérdida de la capacidad de germinación, debido a un secado excesivo.
- Infestación de insectos y el crecimiento de microorganismos.
- Las pérdidas adicionales durante el almacenamiento debido a un secado insuficiente o no uniforme.

En las post-cosechas las pérdidas pueden estimarse en más de 30% y podría ser reducida en gran medida por el secado adecuado de los cultivos.

Hay dos posibles formas para la preservación adecuada de secado:

- mediante el uso de combustibles fósiles

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

- mediante el uso de energía solar

El uso de secadores accionados eléctricamente es limitado e inadecuado para la mayoría de los agricultores de los países desarrollados. Las razones principales son las siguientes:

- La falta de personal calificado para la operación y mantenimiento.
- Las fuentes convencionales de energía no están disponibles o son poco fiables.

Durante algunas décadas, varios países en desarrollo han comenzado a cambiar sus políticas energéticas hacia una mayor reducción de las importaciones de petróleo y de modificar su consumo de energía hacia la utilización de las energías renovables. Con muy pocas excepciones, los países en desarrollo están situados en zonas climáticas del mundo donde la insolación es mucho mayor que el promedio mundial de 3.82 kWh/m² día.

Tabla 2. 1 Datos diarios de insolación media horizontales y horas de sol que se dan para algunos países.

País	Promedio de insolación (kWh/m ² día)	Horas de sol (h/día)
Egipto	6	9.6
Guatemala	5-5.3	
India	5.8	8-10
Indonesia	4.24	
Kenya	5.25-5.6	6-7
Malasia	4.41	6-8
Mali	4.34	8.4
Mauritius	4.5	7
México	4.65	6-8
Nicaragua	5.43	
Nigeria	3.8-7.15	5-7
Nueva Guinea	4.6-9.6	4.5-8
Filipinas	4.55	
Sierra Leona	3.4-5.3	3-7.5
Tailandia	4.25-5.66	
Togo	4.4	5.5-7.2

II Fuente: (Mujumdar A. S., 2007).

Artes de Chiapas
Energías Renovables



Una alternativa a las técnicas tradicionales de secado y una contribución a la solución de los problemas de secado al aire libre es el uso del secado solar. Las principales razones son las siguientes:

1. El secado solar proporciona la deseada reducción de las pérdidas junto con una mejor calidad de los productos desecados.
2. El tiempo de secado se puede reducir significativamente.
3. El período de cosecha se puede acortar, permite al suelo para ser preparado para el cultivo de otra cosecha.
4. La temporada de secado se puede alargar por las cosechas sucesivas y por el uso de secadores solares en los que diversos tipos de productos pueden ser conservados.
5. Los agricultores pueden tener un mayor ingreso por la producción de cultivos comerciales.

En consecuencia, la disponibilidad de la energía solar y el marketing operativo y las razones de la economía ofrecen una buena oportunidad para utilizar el secado solar en todo el mundo. Un gran número de exitosas aplicaciones prácticas ya han sido reportadas (Vargas y Arcelia, 2007).

2.1.3 Contenido de humedad

El factor de mayor influencia en la cinética de secado, que afecta en general a todos los ratios de secado, es el contenido de humedad del material.

Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un producto. Los métodos indirectos utilizan la dependencia de una propiedad del producto (p.ej. conductividad eléctrica) con el contenido de humedad, consiguiendo una medición rápida pero que requiere de un equipo muy

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

especializado. La determinación directa del contenido de humedad implica medir la masa de producto y la masa seca correspondiente al eliminar el agua evaporable contenida en él, aplicando calor a una temperatura generalmente de 104°C hasta llegar a un peso constante de la muestra. Este método, aunque es el más utilizado, presenta como principal inconveniente el que al evaporar el agua se pueden eliminar, al mismo tiempo, otras sustancias del producto (volátiles) lo cual puede suponer errores en la obtención de dicha variable. La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda o en base seca, e indicada como decimal o porcentaje (Montero, 2005).

El contenido de humedad de las semillas (CHS) es la cantidad de agua que hay en una semilla. El agua está presente tanto en forma libre como combinada con los compuestos químicos de las células, como los carbohidratos y las proteínas. De acuerdo al ISTA (International Seed Testing Association), el CHS se expresa en términos del peso del agua contenida en una semilla como porcentaje del peso total de la semilla antes del secado, conocido como peso húmedo o como base de peso fresco (*pf*).

$$CHS (\% pf) = \frac{\text{peso fresco} - \text{peso seco}}{\text{peso fresco}} \times 100 \quad (2.1)$$

El contenido de humedad también se puede expresar con base en el peso seco (*ps*), es decir, la pérdida de peso como porcentaje del peso seco de las semillas.

$$CHS (\% ps) = \frac{\text{peso fresco} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \quad (2.2)$$

El contenido de humedad es el factor más importante para determinar la velocidad a la cual las semillas se deterioran, y tiene un impacto considerable en la longevidad de las semillas en almacenamiento. Incluso pequeños cambios

en el contenido de humedad tienen un gran efecto en la vida en almacenamiento. Es importante determinar el contenido de humedad antes de almacenar las semillas para predecir con exactitud el potencial de vida en almacenamiento que tendrá (Rao et al., 2007).

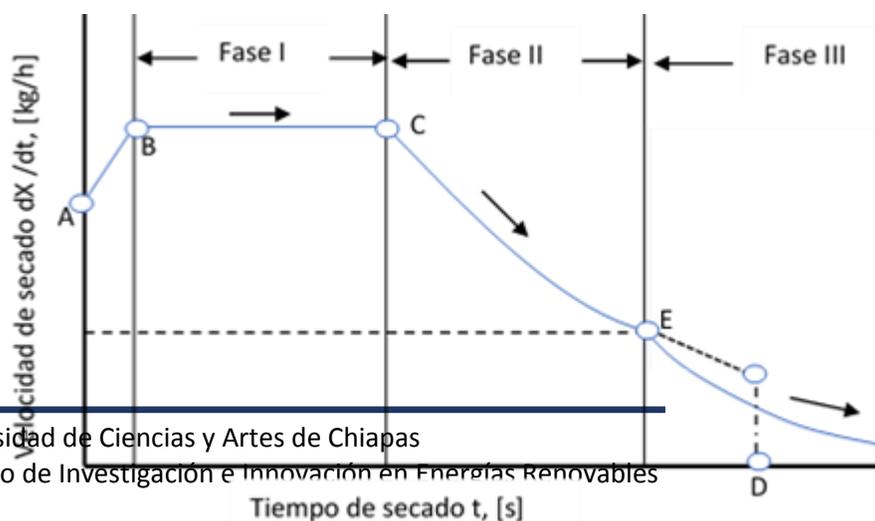
2.1.4 Curva de secado

Un dato muy importante es la velocidad de secado, determinada por la temperatura y el contenido de humedad del producto, así como la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de secado. Los productos agrícolas son higroscópicos y la velocidad de secado por lo tanto es de vital importancia. La velocidad de secado tiene generalmente dos diferentes fases:

Fase I, un período de velocidad constante inicial durante el cual la superficie se satura con vapor y la evaporación se lleva a cabo de forma continua, debido que en la superficie del material existe suficiente agua para evaporarse.

Fase II, el período de velocidad decreciente, cuando la superficie no está saturada de vapor, es decir, en el punto crítico. La difusión de humedad es controlada por el movimiento del líquido interno mientras que la superficie se agota continuamente de agua.

Fase III, la segunda parte del periodo de caída, en donde el contenido de humedad continúa disminuyendo hasta que se alcanza el equilibrio y se detiene el secado. Este segundo período de caída concierne a productos higroscópicos.



El tiempo de secado de cada producto depende de la naturaleza del producto y las condiciones de secado, para la mayoría de los productos el proceso de secado se detiene antes de alcanzar la fase III.

Muchos productos alimenticios no muestran en absoluto una fase a velocidad constante como muchos cultivos tienen un contenido inicial de humedad cerca del punto crítico y alcanzan rápidamente el punto C crítico, (figura 2.1), donde se inicia la fase II.

La figura 2.1 da una visión general de las tres curvas de fase. AB es el tiempo pasado con el fin de calentar el material hasta que se alcanza la temperatura de secado. BC es el secado a velocidad constante, CE la tasa decreciente de secado donde el flujo de humedad del interior masa disminuye continuamente. C es el punto crítico en el que la superficie ya no está saturada y el periodo de decaimiento da inicio. En el punto E todavía hay humedad en el interior del producto, el movimiento del contenido de humedad se realiza lentamente por difusión y el secado puede detenerse, como el ejemplo en el punto D cuando se alcanza el contenido final de humedad. Finalmente, para el material higroscópico la curva es asintótica y secado se detiene cuando se alcanza el equilibrio. El período de secado de estos regímenes, para productos higroscópicos depende del contenido de humedad inicial y el prescrito, contenido de humedad, para el almacenamiento seguro (Belessiotis & Delyannis, 2011).

2.1.5 Actividad del agua α_w

La actividad del agua α_w , es de gran importancia para la conservación de alimentos, ya que es una medida y un criterio de crecimiento de microorganismos y, probablemente, de liberación de toxinas, de desarrollo de pardeamiento enzimático y no enzimático, etc.

Para cada alimento o producto agrícola existe un límite de actividad por debajo del cual los microorganismos dejan de crecer. Beuchat refiere que la gran mayoría de las bacterias crecerá a aproximadamente $\alpha_w = 0.85$, moho y levadura sobre $\alpha_w = 0.61$, hongos a $\alpha_w < 0.70$, etc. En estos casos la actividad del agua se regula en detalle, después de secarse mediante la adición de algunas soluciones de azúcares, almidón, etc.

El agua en los alimentos y en los cultivos agrícolas se presenta en forma de una solución que contiene sales, azúcares, carbohidratos, proteínas, etc., que a temperatura constante se encuentran en equilibrio termodinámico (Beuchat, 1983).

La actividad del agua α_w viene dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha_w = \left(\frac{p_w}{p_w^*} \right)_T \approx \varphi \quad (2.3)$$

Donde p_w es la presión parcial de la solución de agua y p_w^* es la presión parcial de agua pura, a la misma temperatura. φ es la humedad relativa del material a la misma temperatura (Belessiotis y Delyannis, 2011).

2.2 Propiedades psicrométricas del aire

2.2.1 Composición del aire seco

El aire seco, limpio y libre de contaminantes es una mezcla de gases, que al nivel del mar tiene la siguiente composición presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Composición del aire seco.

Constituyente		Porcentajes en volumen (%)	Porcentaje en peso (%)
Nitrógeno	N ₂	78.03	75.47
Oxígeno	O ₂	20.99	23.19
Argón	Ar	0.94	1.29
Bióxido de carbono	CO ₂	0.03	0.05
Hidrógeno	H ₂	0.01	0

Fuente: (Álvarez Morales, 2004).

El aire contiene normalmente, además de los constituyentes antes mencionados, impurezas, como gases, sólidos, polvos, etcétera, en proporciones que dependen de varios factores. En este trabajo, cuando se estudia el aire seco no se consideran las impurezas contenidas en él.

2.2.2 Constante particular del aire seco

El peso molecular del aire seco M_a es de $28.9 \frac{kg}{kmol}$, la constante universal de los gases ideales R_u es de $8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$ y la constante particular del aire se determina como sigue.

$$R_a = \frac{R_u}{M_a} = \frac{8.314}{28.9} = 0.2877 kJ/kgK \quad (2.4)$$

2.2.3 Volumen específico del aire seco

Experimentalmente se ha comprobado que el aire seco se comporta como un gas ideal; por lo tanto, el volumen específico se puede relacionar con la temperatura y presión por medio de la ecuación de estado del gas ideal.

$$v_a = \frac{R_a T}{P_a} \quad (2.5)$$

2.2.4 Calor específico del aire seco

El calor específico (C_{pa}) del aire no es constante, sino que depende de la temperatura. A una presión de 1.013 bar y un intervalo de temperatura de -40 a 60°C, el C_{pa} varía tan sólo por 0.996 kJ/kg K.

2.3 Propiedades del vapor de agua

El aire atmosférico contiene una cierta cantidad de vapor sobrecalentado de agua.

2.3.1 Constante particular del vapor de agua

El peso molecular del agua (M_v) es de 18 kg/kmol y la constante particular del vapor de agua equivale:

$$R_v = \frac{R_u}{M_v} = 0.4619 \text{ kJ/kgK} \quad (2.6)$$

2.3.2 Volumen específico del vapor de agua

El vapor de agua contenido en el aire atmosférico, raramente excede presiones de 0.0343 bar, y se encuentra a temperaturas por debajo de 65 °C; a estas condiciones, el vapor de agua saturado o sobrecalentado se comporta como gas ideal, con suficiente exactitud.

Es por eso que, se justifica el uso de la ecuación de estado del gas ideal para calcular el volumen específico del vapor de agua:

$$V_v = \frac{R_v T}{P_v} \quad (2.7)$$

2.3.3 Calor específico del vapor de agua

La experimentación indica que el calor específico para vapor saturado y sobrecalentado aumenta levemente en el intervalo de temperaturas de -70 °C a 124 °C.

Por convención y puesto que repercute con un error insignificante, se toma el valor del calor específico para vapor saturado y sobrecalentado de 1.86 kJ/kg °C.

2.3.4 Entalpía del vapor de agua

El calor específico del vapor saturado y del vapor sobrecalentado es substancialmente igual a temperaturas y presiones relativamente bajas, tomando como referencia que a 0°C la entalpía del vapor de agua es 0 kJ/kg, el cambio de la entalpía del vapor de agua se calcula con la siguiente expresión:

$$h_v - h_{ref} = (h_{fg})_{T_{ref}} + C_p(T_v - T_{ref}) \quad (2.8)$$

Como a presiones y temperaturas bajas la entalpía del vapor sobrecalentado, solo depende de la temperatura, como se puede apreciar en la figura 2.2.

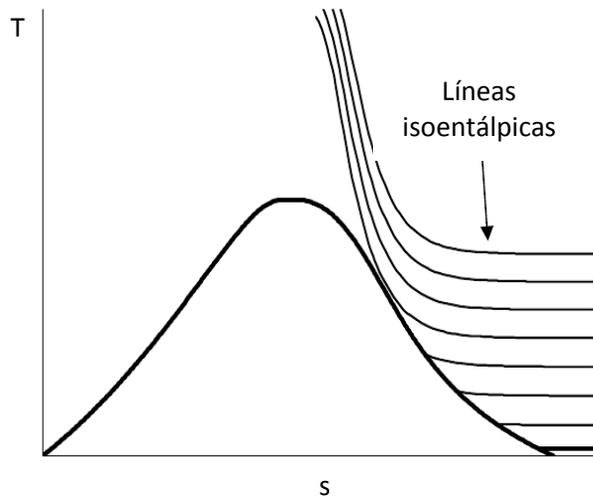


Figura 2. 2 Diagrama T-s del vapor de agua. Líneas isoentálpicas.
Fuente: (Álvarez Morales, 2004)

Es por esto que, la entalpía del vapor sobrecalentado de agua a una temperatura dada se puede aproximar a la entalpía de saturación correspondiente a esta temperatura:

$$h_v = (h_g)_{Tbs} \quad (2.9)$$

Haciendo esta consideración se tienen errores intrascendentes que afectan muy poco a los cálculos.

2.3.5 Entropía del vapor de agua

Las entropías del vapor de agua (s_v) se obtienen en tablas de vapor saturado seco o vapor sobrecalentado, con sus respectivos valores de la temperatura y de la presión a las que se encuentre el vapor.

2.3.6 Humedad específica

La humedad específica (w), también conocida como relación de humedades, puede ser definida como la masa de vapor de agua (m_v), comparada con la masa del aire seco (m_a), expresada en kg de vapor por kg de aire seco.

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.10)$$

Considerando al aire y al vapor como gases ideales se tiene que,

$$w = \frac{R_a T p_v V}{R_v T p_a V_a} = \frac{R_a p_v}{R_v p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a} \quad (2.11)$$

Al sustituir la expresión de la presión parcial del aire de la ecuación 2.12,

$$p_a = p_{atm} - p_v \quad (2.12)$$

se tiene que la humedad específica es:

$$w = 0.622 \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} \quad (2.13)$$

Esto es sólo para mezcla aire-vapor (de agua), ya que el factor 0.622 es el cociente de los pesos moleculares del aire y del vapor de agua.

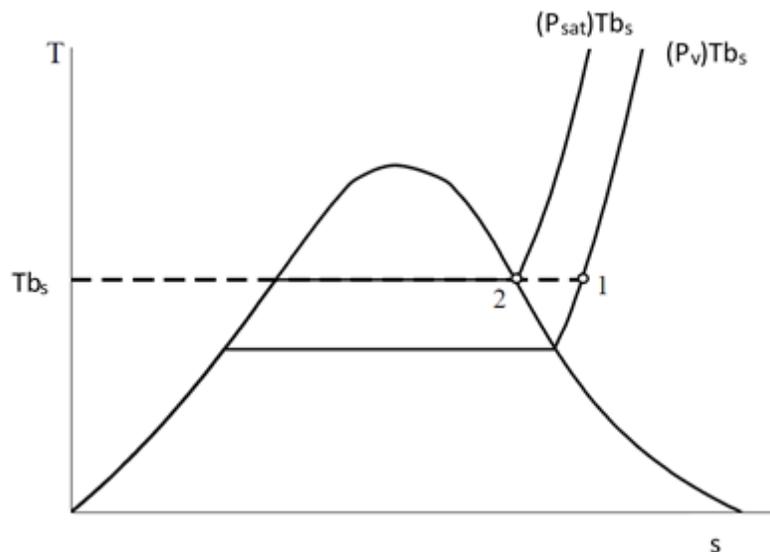
2.3.7 Humedad relativa

La humedad relativa se define como la relación entre la presión parcial del vapor del aire y la presión de saturación correspondiente a la temperatura de bulbo seco de la mezcla, (ver figura 2.3), y se expresa de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{(p_v)_{T_{bs}}}{(p_{sat})_{T_{bs}}} \quad (2.14)$$

La humedad relativa también se puede definir en términos de las densidades y volúmenes específicos del vapor. Se deduce aplicando la ecuación de estado del gas ideal, y se tiene que la humedad relativa es igual al cociente de la densidad del vapor y de la densidad de saturación o igual al cociente del volumen específico del vapor y el volumen específico de saturación, correspondiente a la temperatura de bulbo seco, esto es:

$$\phi = \frac{(p_v)_{T_{bs}}}{(p_{sat})_{T_{bs}}} = \frac{(v_{sat})_{T_{bs}}}{(v_v)_{T_{bs}}} \quad (2.15)$$



2.3.8 Humedad absoluta

La masa del vapor (m_v) expresada en kg por cada metro cúbico de espacio (V_a) se llama humedad absoluta o densidad del vapor de agua (d_v) (Álvarez Morales, 2004).

$$HA = \frac{m_v}{V_a} \quad (2.16)$$

2.4 Clasificación de los secadores solares

Debido a que la humedad es uno de los factores que contribuye seriamente a la descomposición de alimentos, se han diseñado secadores orientados al secado de cierto tipo de alimentos. Por ejemplo: granos, carne, frutas y vegetales, entre otros.

Dichos dispositivos constan con las características necesarias para lograr el secado óptimo. La clasificación para los secadores es muy amplia, sin embargo, la más general está dada por el método con el que se lleva a cabo la transferencia de calor, que puede ser:

- a. Convección (secadores en bandejas o charolas, de túnel, rotatorios, por aspersión, etc.).
- b. Conducción (secadores de tambor, indirectos al vacío con anaqueles, etc.)
- c. Radiación (secadores solares).

A su vez, se subdividen de acuerdo al tipo de contenedor del secador: charolas, tambor, túnel, aspersión, etc.

2.4.1 Secadores por convección

Los secadores cuya transferencia de calor es por convección son utilizados para secar partículas y alimentos en forma laminar o en pasta. El calor se suministra a través de aire caliente o gas, el cual fluye sobre la superficie del sólido.

Ejemplos de secadores convectivos o directos:

- Secadores en bandejas o charolas: funciona mediante un ventilador que recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas.
- Secadores de túnel: usan compartimientos que operan en serie, las bandejas se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes sobre la superficie de cada bandeja. Un ventilador extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.
- Secadores rotatorios: consta de un pequeño cilindro que gira sobre su eje con una ligera inclinación. El calentamiento se lleva por contacto directo de gases caliente mediante un flujo a contracorriente, también puede ser a través de la pared calentada del cilindro.

2.4.2 Secadores por conducción

Los secadores por conducción o indirectos son apropiados para productos de poco espesor o para sólidos con alto grado de humedad. El calor para

evaporación se suministra a través de superficies calientes. Ejemplos de secadores indirectos:

- Secadores de tambor: consta de un tambor de metal calentado que gira, en cuyo interior se evapora una capa delgada de líquido o suspensión hasta secar, después se raspa el sólido seco.
- Secadores indirectos al vacío con anaqueles: es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles que opera al vacío. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se usa principalmente para materiales sensibles a la temperatura o que se oxiden fácilmente.

2.4.3 Secadores por radiación

El secado por radiación se lleva a cabo mediante radiación electromagnética cuya longitud de onda se encuentra dentro del rango de espectro solar y microondas.

Ejemplo de secador por radiación solar:

- Secadores solares: está formado principalmente por un gabinete cubierto cuya tapa consta de un material translucido que deja pasar los rayos del sol, de esta manera se utiliza la energía de los rayos en forma de calor para lograr la evaporación de la humedad del sólido. Sin embargo, el funcionamiento de este secador depende de las condiciones climáticas y los tiempos de secado suelen ser largos, además de tener una capacidad de producción pequeña.

El desempeño de un secador se puede medir de acuerdo a su capacidad o efectividad energética. La tasa de humedad extraída (MER, kilogramos de

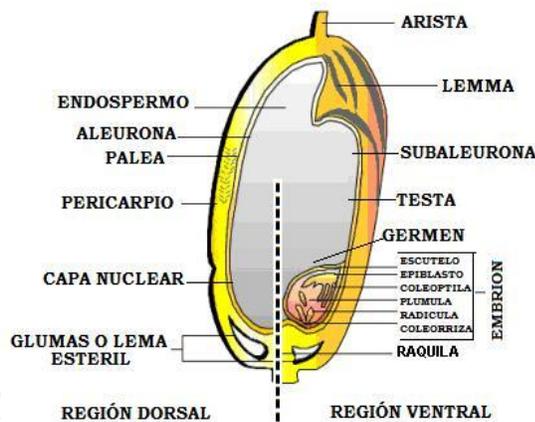
humedad removida por hora) indica la capacidad del secador. La tasa de extracción de humedad específica (SMER, kilogramos de humedad removida por kilowatt-hora) define la efectividad de la energía usada en el proceso de secado (Vargas y Arcelia, 2007).

2.5 Los granos

Las semillas constituyen la base principal de la alimentación humana y como materia prima son componentes fundamentales en la industria alimentaria. Son frutos de varias especies vegetales como los cereales, las oleaginosas, las leguminosas y otras similares, al completar su periodo vegetativo son recolectados y comercializados, se los consume con un alto contenido de humedad o secos. Con las operaciones a las que se someten los granos (recolección, secado, acondicionamiento y almacenamiento) se procura mejorar su calidad, minimizar las pérdidas y retribuir económicamente a los agricultores.

2.5.1 Partes del grano

Los cereales son el grupo de granos más conocidos, pertenecen a la familia de las gramíneas y su fruto es una cariósipide, como se observa en la figura 2.4, consta de cinco partes: cáscara, pericarpio, tegumento, endospermo y embrión. Conocer a fondo su estructura y composición química es necesario para entender los cambios que sufre en las fases de postcosecha y procesamiento industrial.



- La cáscara. No es una parte específica del cereal, es una estructura floral de cierta dureza, recubre a la semilla contra agentes externos como insectos y humedad, su misión es contribuir con una mejor conservación del grano.
- El pericarpio. Esta capa consta de una parte externa y de una interna, protege al grano contra los efectos de los insectos y la humedad.
 - *Parte externa*, consta de tres capas: epicarpio, mesocarpio y endocarpio.
 - *Parte interna*, está conformada por dos tipos de células las cruzadas y las tubulares.
- Tegumento o testa. Es una capa muy fina que recubre a la semilla y se encuentra adherida al pericarpio, el color en varios granos depende de ciertos pigmentos que existen en esta estructura.
- Endospermo. Es la reserva alimentaria para la nueva planta, contiene proteínas y carbohidratos, está constituido por una capa de aleurona, el endospermo córneo, vítreo y harinoso.
- Embrión. Es el responsable de generar una planta nueva en condiciones favorables (humedad, calor y oxígeno) al germinar la semilla, contiene nutrientes como grasas, proteínas, vitaminas, azúcares y minerales, es la parte más susceptible del grano al ataque de microorganismos e insectos

que afectan la calidad del producto. Consta del escutelo y el eje embrionario que está integrado por la radícula y la plúmula, que forman las raíces y la parte vegetativa de la planta.

2.5.2 Características y propiedades físicas de los granos

2.5.2.1 Forma y tamaño

Esta característica varía de manera significativa según cada especie de grano, hay once órdenes de magnitud de diferencia en tamaño entre las semillas más pequeñas y las más grandes. Las grandes y pesadas producen plántulas fuertes, con un satisfactorio desarrollo de raíces y tallos, por tener una reserva mayor de nutrientes con los que la planta vive en su etapa inicial. El tamaño pequeño es típico de algunas variedades e indica un menor vigor en la planta al tener menos 28 nutrientes, lo que no constituye una gran desventaja.

2.5.2.2 Densidad

Se define como la relación entre el peso del producto y el volumen del mismo, hay dos clases la aparente y la real.

- Aparente. Es la relación entre el peso y el volumen total del cereal, incluyendo los espacios intersticiales que dejan los granos entre sí, varía con el contenido de impureza y humedad.
- Real. Es la relación entre el peso y el volumen real ocupado por los granos, es decir excluyendo los espacios vacíos.

2.5.2.3 Porosidad

Es una propiedad física que depende de la forma y tamaño de la semilla, debido a la naturaleza coloidal y a los espacios intergranulares, el volumen de aire intersticial es del orden del 35% al 40%, esta característica permite al aire entrar y circular a través de la masa de granos, mientras mayor porosidad haya más fácil es la conservación del producto.

2.5.2.4 Esfericidad o factor de forma

No todos los cereales son esféricos la mayoría son irregulares; una manera de medir este parámetro es con el factor de forma (ϕ), el cual comprende la relación entre el área de una esfera y la del grano, los dos con el volumen constante.

2.5.2.5 Características organolépticas

Son propiedades que perciben nuestros sentidos, entre ellas se destacan el color, olor y sabor.

- *Color.* Tiene escalas definidas de tonalidades, sin embargo, hay matices que solo el ojo humano reconoce, debido a la forma y tamaño de ciertas partículas se producen ciertas interferencias en la determinación del color.
- *Olor.* Hay varias técnicas empleadas para determinar esta propiedad, entre ellas están las instrumentales y las manuales, en las primeras se

utilizan cromatógrafos y detectores de gases, mientras que las segundas se refieren al estudio de cómo los receptores perciben los olores.

- *Sabor.* Las papilas gustativas situadas en la lengua y en el paladar se encargan de determinar esta característica, los gustos básicos dependen de la estructura química del producto y son ácidos, salados, dulces y amargos.

2.5.3 Humedad en los granos

El agua tiene una participación activa en la formación de los granos, ya que por este medio se transportan las sustancias nutritivas de la planta desde las raíces y las hojas. La calidad de una semilla está en gran medida determinada por su humedad. El alto contenido de agua es uno de los factores que causan pérdidas en el producto, su control inadecuado en las operaciones de postcosecha conlleva a un calentamiento de la masa de grano y genera focos de hongos e insectos. Los cereales son poco susceptibles al ataque de microorganismos en cualquier medio con contenidos de agua inferiores al 13%, si esta es igual al 15% se encuentran en el límite para estimarlos como secos. En resumen, una baja humedad y baja temperatura aseguran una larga vida en el grano.

2.5.3.1 Formas de agua presentes en el grano

Los cereales, oleaginosas, leguminosas y otros granos, al alcanzar su madurez fisiológica cuentan con su propia cantidad de agua que se presenta en diferentes formas y es independiente de las demás partes de la planta.

- Agua absorbida. Se encuentra en los espacios intergranulares, de forma superficial o dentro de los poros del material y es sostenida por fuerzas capilares, posee las mismas propiedades que el agua libre.
- Agua adsorbida. Está sostenida por atracción molecular, resultante de la interacción entre las partículas de agua y aquellas que componen el grano, es atraída por fuerzas de Van der Waals y de Valencia.
- Agua de constitución. Se trata del líquido combinado con la materia seca y sostenido por fuertes uniones químicas, es de difícil remoción, en ocasiones es separado en condiciones controladas mediante algunos métodos de determinación de humedad.

2.5.3.2 Métodos para determinar el contenido de humedad en los granos

Las técnicas para determinar la cantidad de agua son los métodos directos o primarios y los indirectos o secundarios.

- Métodos primarios. Son aquellos que miden de forma directa el contenido de agua del producto por diferencia de peso, reacción química o absorbencia de luz, los principales son de estufa, destilación, químicos, absorción nuclear y de rayos infrarrojos.
- Métodos secundarios. Llamados también indirectos, usan como principio la conductividad eléctrica y las propiedades dieléctricas las cuales dependen del contenido de humedad del producto, los principales son el método de la resistencia eléctrica y de la capacitancia.

2.5.3.2.1 Método de diferencia de peso

Esta técnica es la más usada en laboratorios y la empleada en este proyecto para determinar la humedad inicial del grano, hay varios procedimientos por lo general se utiliza un horno o una estufa. En este método la muestra de granos

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

se calienta bajo condiciones específicas y la diferencia de peso se emplea para calcular el contenido de humedad de la misma, dicho valor depende del tipo de horno utilizado, el tiempo y la temperatura de secado.

El aire es calentado a presión atmosférica y se lo hace circular ya sea por convección natural o por medios mecánicos, esta técnica es utilizada por varios organismos internacionales para determinar el contenido de agua.

De forma generalizada se usa 130 [°C] para granos que no tienen cantidades excesivas de sustancias volátiles y de 100 a 105 [°C] para los que presentan una alta descomposición de la materia seca a temperaturas elevadas. El contenido de humedad de se determina en una o en dos etapas.

- Una Etapa. Se aplica para un contenido de humedad menor al 18% con una temperatura de secado de 130 [°C].
- Dos Etapas. Se emplea para un contenido de humedad igual o mayor al 18%, en un inicio se lo realiza a una temperatura de 100 a 105 [°C] hasta obtener un contenido de agua entre 7% y 17%, después se lo enfría y luego se procede como en el caso de una etapa.

En los dos casos para determinar la cantidad de agua final se realiza la diferencia

de pesos entre la muestra inicial y la obtenida al finalizar el proceso. La humedad

se determina con la ecuación 2.17.

$$\%Humedad = Nx \frac{100}{P} \quad (2.17)$$

Donde:

N: diferencia de peso, [kg]

P: Número de gramos de la muestra que es igual a la diferencia entre el peso del grano con agua y el del libre de humedad, [kg]

En este método se realizan pruebas sucesivas que consisten en secar en el horno el producto, luego enfriarlo y repetir este proceso hasta que el peso final sea uniforme, esta medida se toma de inmediato para impedir que haya un intercambio de humedad con el aire ambiente.

Sin importar la técnica que se utilice es necesario que el producto pase por un proceso previo en el que se lo limpia y clasifica según su forma y tamaño, para tener una muestra homogénea y que la extracción de humedad en cada grano se dé en el mismo nivel.

2.5.4 Secado del grano

La cosecha del grano se realiza el momento en que éste alcanza la madurez fisiológica, es decir cuando la humedad es superior a la adecuada para la conservación, en este ambiente el producto tiene efectos como el calentamiento y deterioro, una semilla con un contenido de agua bajo se encuentra en óptimas condiciones para almacenarse por el mayor tiempo posible, por lo que el secado es indispensable.

Si el medio es favorable en cuanto al clima, el método natural tiene éxito, caso contrario se usa equipos especiales, de manera que el proceso se realiza en forma natural o artificial.

2.5.4.1 Secado natural

Consiste en utilizar la energía solar y del viento para secar las semillas, es adecuado solo cuando la humedad en los granos no es muy alta, depende de las condiciones ambientales, requiere de un largo tiempo y trabajo de los agricultores, además se corre el riesgo de exponer el producto a la

contaminación con polvo e impurezas y la infestación de insectos durante el tiempo de secado.

2.5.4.2 Secado artificial

Consiste en alterar las propiedades físicas del aire, es decir aumentar su velocidad y temperatura acondicionándolas para cada semilla, hay dos maneras de realizar este secado por ventilación y por aire caliente.

- Secado por ventilación. Este método es efectivo cuando la humedad relativa del aire es baja, consiste en impulsar el gas a temperatura ambiente a través de la semilla, se almacena en suelos o en contenedores ventilados.
- Secado por aire caliente. Esta técnica consiste en calentar el aire antes de impulsarlo a través del grano, de esta forma se reduce más la humedad relativa del cereal y se disminuye el tiempo de secado.

Según como fluyen las partículas dentro del proceso, se consideran tres sistemas de secado artificial: estacionario, continuo e intermitente, que se detallan a continuación.

- Secado Estacionario.

En este sistema los granos no se mueven durante el proceso, por ejemplo, en los equipos de falso fondo y en los de túneles con bolsas de semillas. Las principales características son las siguientes:

Humedad relativa (HR) del aire. Al inicio se encuentra entre el 40% y 70% o incluso menor pues en este punto la humedad del grano es alta y la temperatura baja y se pretende que estén en equilibrio higroscópico, mientras que al final del secado es mayor al 70% para evitar el sobresecamiento de la semilla.

Temperatura. El valor máximo es 40 [°C], si los granos tienen un alto contenido de aceite se recomienda que sea menor a 37[°C].

Flujo de Aire. Cumple dos tareas fundamentales, primero absorbe la humedad de la superficie de la semilla y segundo la lleva hacia el exterior del secador, mientras mayor sea la cantidad de agua mayor es el flujo.

- Secado Continuo

Este sistema es usado para grandes volúmenes de granos, el producto está en contacto con aire caliente durante todo el proceso, en estos equipos hay un movimiento lento de la semilla en la tolva de secado. Si la cantidad de agua no llega al punto deseado el cereal recircula a dicha tolva hasta obtener la humedad requerida. Los aspectos más importantes son los siguientes:

Temperatura. Es importante no exceder de 40[°C] ya que el grano está siempre en contacto con el aire caliente.

Descarga. En algunos cereales se recomienda realizar por lo menos una recirculación de la semilla, para evitar que se fracture por el tiempo de exposición al calor.

Determinación de la humedad. Es recomendable tomar muestras de descarga del secador cada 15 minutos para determinar la humedad de las semillas.

- Secado por Lotes

Tiene un proceso más largo, se lo lleva a cabo con aire caliente impulsado a través de los contenedores de la semilla, una vez finalizado el producto se enfría hasta la temperatura ambiente y se mezcla con el resto de granos resultantes de cada lote. Los principales aspectos son los siguientes:

Temperatura. Es un factor controlado y para evitar un choque térmico se recomienda iniciar el secado con 35 a 40 °C en los primeros 15 minutos, posteriormente subir la temperatura a la máxima y en los últimos 15 minutos bajarla a 40 °C.

Homogeneización. Una vez secos los granos se colocan en una caja de enfriamiento durante una o dos horas para que la humedad del interior de la semilla brote hacia la periferia, entonces se minimizan los problemas de fracturas.

Determinación de la humedad. Es recomendable tomar muestras de descarga del secador cada 15 minutos para determinar la humedad de las semillas (Jaramillo Calle & Narváez Quiranza, 2012).

2.6 Diseño mecánico de secadores solares rotatorios

2.6.1 Detalle del proceso de secado

El proceso de secado de los productos agrícolas se produce por la energía entregada de los gases al producto y por el arrastre de vapor extraído, para luego obtener el material seco.

Para el dimensionamiento de los sistemas que conforman el secador rotatorio se los divide en:

- Cámara de secado
- Estructura mecánica
- Aislante térmico
- Sistema térmico
- Sistema motriz

A continuación, se describen los aspectos de estudio de cada uno de los elementos mecánicos del secador solar rotatorio.

2.6.2 Dimensionamiento de la cámara de secado

El dimensionamiento del cilindro de secado se lo realiza tomando en cuenta las condiciones extremas, es decir que en cualquier instante el cilindro contiene toda la capacidad nominal de la masa a deshidratar [kg]. Debido a que la máquina seca en forma continua, esta no da lugar a llegar a las condiciones extremas. Las dimensiones del cilindro de secado están en función directa de la capacidad o cantidad de producto a tratar.

Para permitir que exista un acelerado tratamiento será indispensable tener un volumen del cilindro de secado mayor a la ocupada por el producto. El volumen que ocupa el producto es igual a la relación de su masa por la densidad del mismo, es decir:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.18)$$

Donde:

m: Masa del producto [kg]

ρ : Densidad del producto [kg/m³]

V: Volumen nominal

Como el volumen de la cámara de secado es cilíndrico tenemos.

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad (2.19)$$

2.6.3 Selección del espesor del cilindro

El material seleccionado al tratarse de un proceso consecutivo en el cual las anteriores máquinas están hechas de hierro fundido o dulce.

Para seleccionar el espesor óptimo se tiene en cuenta lo siguiente:

La presión que soporta el cilindro en su interior está dada por la siguiente fórmula:

$$P = \frac{P_p}{A_p} \quad (2.20)$$

Donde:

P: Presión que ejerce el producto sobre las paredes del cilindro, Kg/mm²

P_p : Peso del producto, Kg

A_p : Área comprendida por el producto en el interior del cilindro, m²

Para calcular el área se emplea la siguiente fórmula:

$$A_p = \pi * D * L \quad (2.21)$$

Tomando al cilindro como de pared delgada, entonces los esfuerzos a los que está sometido son los siguientes:

$$\sigma_{tra} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} \quad (2.22)$$

$$\sigma_{lon} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} \quad (2.23)$$

Donde

σ_{tra} : Esfuerzo circunferencial o de aro, [kg/cm²]

σ_{lon} : Esfuerzo longitudinal, [kg/cm²]

D: Diámetro interior del cilindro, [mm]

P: Presión que ejerce el producto sobre las paredes del cilindro, [kg/cm²]

t: Espesor del material, [mm]

2.6.4 Diseño energético

2.6.4.1 Calor consumido por el sistema

La cantidad de calor consumido por el sistema se determina por la siguiente ecuación.

$$Q_{cs} = Q_{producto} + Q_{perdido} \quad (2.24)$$

Donde:

Q_{cs} : calor consumido por el secador

2.6.4.2 Calor consumido por el producto

Con el flujo másico del producto y el calor específico del producto se podrá obtener el calor requerido para elevar la temperatura ambiente a la temperatura de requerida.

$$Q_{\text{producto}} = m * C_p * (T_f - T_{ep}) \quad (2.25)$$

Donde:

T_{ep} : temperatura de entrada, [°C]

C_p : calor específico a presión constante para el producto [kJ/kg°C]

T_f : temperatura final, [°C]

m : masa del producto, [kg]

2.6.4.3 Calor perdido

Para calcular el flujo de calor perdido para los espesores que conforma el cilindro de secado, se utiliza el método de las resistencias eléctricas, tanto de convección como de conducción (Chamorro Sangoquiza, 2012).

La ecuación que rige la resistencia térmica por convección es:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A} \quad (2.26)$$

Donde:

R_{conv} : resistencia térmica por convección, [°C/W]

h : coeficiente de convección, [W/m²]

A: área transversal al flujo de calor. [m²]

La ecuación siguiente rige a la resistencia térmica por conducción para un cilindro es:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2*\pi*K*L} \quad (2.27)$$

Donde:

R_{cond} : resistencia térmica por conducción, [°C/W]

r_{ext} : radio externo del cilindro en estudio, [m]

r_{int} : radio interno del cilindro en estudio, [m]

L: longitud del cilindro, [m]

K: conductividad térmica del material, [W/m°C]

En la figura 2.5 se indica las diferentes partes del cilindro de secado, para realizar el estudio de la pérdida de calor en el interior del mismo hacia los

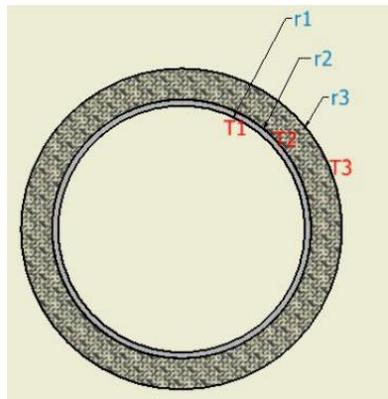


Figura 2. 5 Partes y temperaturas del cilindro de secado.
Fuente: (Chamorro Sangoiza, 2012).

alrededores.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

Para una mejor comprensión de la transferencia de calor a los exteriores del secador se esquematiza un circuito térmico representado en la figura 2.6.

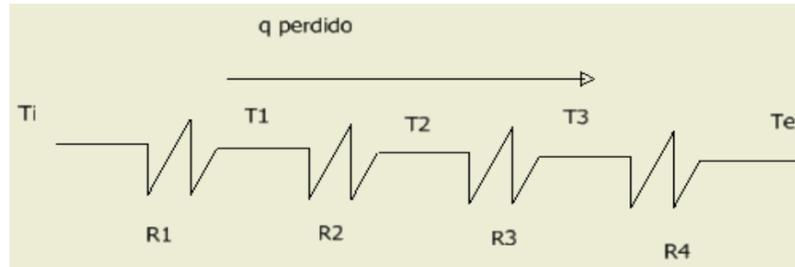


Figura 2. 6 Circuito térmico del flujo de calor perdido.
Fuente: (Chamorro Sangoquiza, 2012).

Como el circuito se encuentra en serie la suma de las resistencias dará la resistencia térmica total equivalente como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$R_{Total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2.28)$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_i * A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * K_2 * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * K_3 * L} + \frac{1}{h_e * A_e} \quad (2.29)$$

Donde:

h_i : coeficiente de convección en la cámara, [W/ m²°C]

h_e : coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente, [W/m²°C]

A_1 : área transversal al flujo de calor a la entrada del cilindro de secado, [m²]

A_e : área transversal al flujo de calor del exterior del cilindro de secado, [m²]

L : longitud del cilindro de secado, [m]

K_2 : conductividad térmica para el acero, [W/m°°C]

K_3 : conductividad térmica para el aislante, [W/m°°C]

r_1 : radio interior lámina de acero, [mm]

r_2 : radio exterior lámina de acero, [mm]

r_3 : radio exterior del aislante, [mm]

Para conocer la cantidad de calor perdido se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{perdido} = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{(T_i - T_0)}{R_{Total}} \quad (2.30)$$

Donde:

$Q_{perdido}$: Flujo de calor, [W]

ΔT : variación de temperaturas, [°C]

T_i : temperatura interna en el cilindro de secado, [°C]

T_0 : temperatura externa del medio ambiente, [°C]

R_{Total} : resistencia total, [°C/W]

2.6.4.4 Selección del espesor óptimo del aislamiento

Los materiales aislantes tienen como principal característica física su baja conductividad térmica la cual expresa la mayor o menor dificultad del material para permitir la transferencia de calor.

2.6.4.4.1 Normas técnicas que deben cumplir los materiales aislantes

Todo material aislante debe cumplir ciertos requisitos mínimos para ser considerado como tal, los cuales deben ceñirse a normas técnicas de evaluación elaboradas por entidades especializadas.

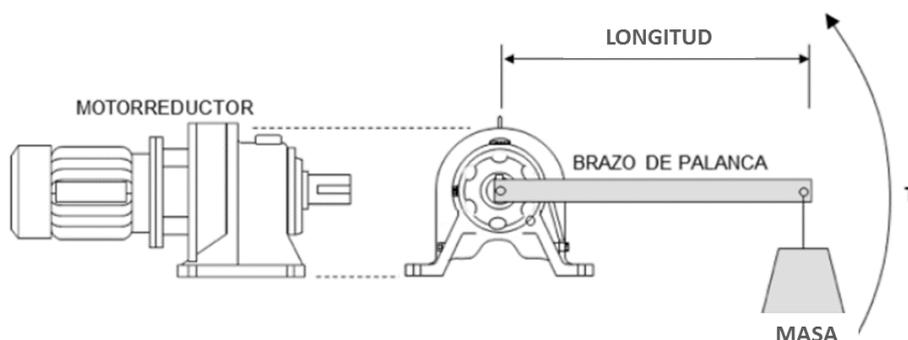
Estos requisitos están dirigidos a obtener información acerca de lo siguiente:
Características dimensionales.

- Densidad
- Propiedades de transferencia de calor
- Máximas temperaturas de uso
- Análisis químicos
- Resistencia al fuego
- Absorción de agua, etc.

2.6.5 Selección del motorreductor para rotación del cilindro

Un motor eléctrico tiene una determinada potencia en HP y tiene una cierta velocidad de operación a la cual gira la flecha de salida, conocido como Revoluciones por Minuto (RPM). Estas dos características: Velocidad y Potencia llevan aparejado un cierto “torque” o “par” que puede liberar el motor. Es precisamente el “par” lo que permitirá que podamos o no girar una determinada carga, cuanto más alto el “par” más grande será la carga que podemos girar. El que tan rápido podamos hacerlo dependerá de la potencia del motorreductor. Las dos características están interrelacionadas y dependen una de la otra.

Para la selección de un motorreductor, es necesario conocer la fuerza torsional o par suficiente para hacer girar cierta masa sujeta a un volante solidario de cierta longitud, unida hacia la flecha de salida. Ese trabajo de giro con esa carga lo podría hacer indefinidamente ya que la potencia sería suficiente para mantenerlo girando aún con el par opositor.



Esta combinación de potencia, par y velocidad en un motor o motorreductor está regida por la siguiente fórmula y se encuentra dada en (kg-m):

$$T = \frac{HP}{RPM} \quad (2.31)$$

Tomando en cuenta que el cilindro de secado gira con el eje debe existir sobre estos elementos volantes solidarios a este par de elementos como se indica en la siguiente figura 2.8.

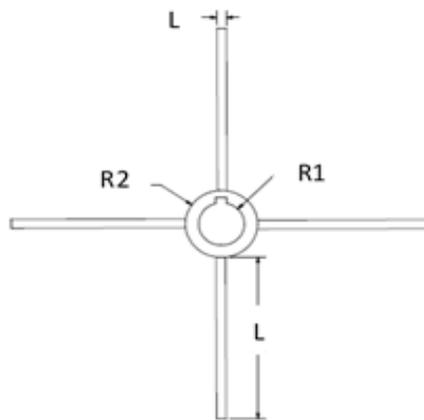


Figura 2. 8 volantes solidarios.

Fuente: (Chamorro Sangoquiza, 2012).

Las condiciones con las cuales se realizan los cálculos son en los casos extremos con la finalidad de encontrar un factor de seguridad que de un buen funcionamiento y no existan fallas. Es por ello que los cálculos se cuándo el cilindro está en reposo, ya que ahí el motor requerirá la mayor potencia,

también se debe considerar el volumen máximo ocupado por el producto en el interior del cilindro de secado, como se indica en la siguiente figura 2.9.

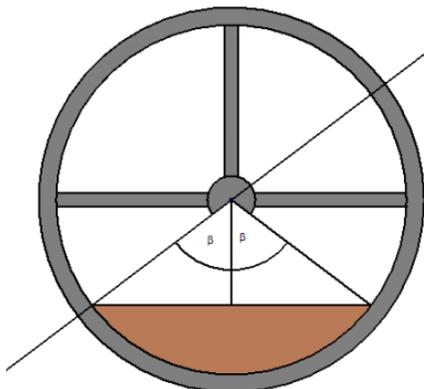


Figura 2. 9 Ubicación del producto al interior del secador.
Fuente: (Chamorro Sangoquiza, 2012).

2.7 Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica de esta sección puede concluirse que, para la selección de los secadores y su factibilidad, los parámetros que deben de ser tomados en cuenta antes de diseñar un nuevo prototipo son, el tipo de producto que se va a manipular y las características del entorno o zona de emplazamiento, esto con el fin de seleccionar el mejor material de construcción para el prototipo.

Por otra parte, es necesario tomar en cuenta los principales criterios usualmente utilizados para la evaluación de sistemas de secado solar, como son la cinética de secado y la eficiencia térmica del secador, dichos criterios permiten desarrollar un bosquejo predictivo del prototipo del secador solar y a su vez contribuye a mejorar el dimensionamiento del mismo. Sin embargo, en la literatura consultada sugiere considerar parámetros adicionales en el diseño y evaluación de secadores solares tales como uniformidad de secado del

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL SECADO

producto, facilidad de construcción y reproducción, entre otros; con el fin de facilitar el estudio comparativo del prototipo de secador solar.

Es por ello que, en base a los criterios de diseño mencionados anteriormente este trabajo de investigación presenta una buena perspectiva para realizar el proceso de secado en granos con el desarrollo de un secador rotatorio alimentado únicamente por energía renovable mediante el calentamiento del aire a través de colectores solares.

“Una máquina puede hacer el trabajo de 50 hombres ordinarios, pero ninguna máquina puede hacer el trabajo de un hombre extraordinario.” (Elbert Hubbard)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se plantea la metodología para la determinación del diseño, la construcción y la evaluación de un secador solar rotatorio, para su implementación en los procesos de deshidratado de granos. Para lo cual se hace uso de los fundamentos teóricos que han sido reportados por diversos autores hasta la fecha en los distintos trabajos de investigación enfocados hacia el análisis de este tipo de tecnologías. De los cuales se pueden obtener datos relevantes que aseguren un diseño eficiente del prototipo y a su vez ayuden a implementar un proceso de construcción y evaluación del mismo de una manera práctica y eficaz.

3.2 Sitio de experimentación

El prototipo experimental del secador solar rotatorio para granos situado en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIIER), perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) ubicado en el municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, el municipio se encuentra localizado en las coordenadas 16°45'11" latitud norte y 93°06'56" longitud oeste; a una altura de 522 m.s.n.m. y representa el 0.44% de la superficie del estado de Chiapas y presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura promedio de 25.8 °C (INEGI, 2005; INEGI, 2015).

La irradiación solar anual y los valores de humedad relativa promedio anual registrada en 22 años, por la base de datos de (Atmospheric Science Data Center, 2018) es de 5.17 kWh/m² y 76% respectivamente, en la tabla 3.1 se

muestra la radiación solar promedio por meses, y en la tabla 3.2 se presentan los valores de humedad relativa promedio por meses.

Tabla 3. 1 Radiación solar promedio incidente en una superficie horizontal (kWh/m²/día).

Lat 16.451 Lon 93.065	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
22 años promedio	5.58	6.37	7	7.12	5.62	3.7	3.63	3.49	4.38	5.12	4.97	5.22	5.17

Fuente: Atmospheric Science Data Center (2018).

Tabla 3. 2 Humedad relativa promedio (%).

Lat 16.451 Lon 93.065	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
22 años promedio	62.4	69.6	75.1	76.3	80.2	83	83.4	84.3	85.5	81.5	69.7	60.9	76

Fuente: Atmospheric Science Data Center (2018).

3.3 Diseño del dispositivo

3.3.1 Revisión bibliográfica

La selección de la tecnología empleada en el desarrollo de este proyecto es producto de un arduo trabajo de revisión bibliográfica. La cual consistió en la consulta de bases de datos científicas y journals de alto impacto relacionadas al tema de secado solar.

Donde se empleó la estrategia de búsqueda por palabras clave y en el caso de los autores citados con frecuencia se llevó a cabo la búsqueda usando sus nombres.

A demás de esto se consideraron trabajos y libros relacionados al tema, los

cuales se encuentran bajo resguardo de la biblioteca central de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, lo cual dio como resultado la obtención de información de gran interés para el desarrollo del trabajo de investigación.

Por lo cual, al término de la revisión bibliográfica, la información esencial procedente recabada de cada estudio de acuerdo al objetivo planteado en la revisión fue organizada en una tabla donde se hace un apartado para nombre del o los autores, el año del trabajo, el propósito del mismo, las muestras del producto utilizadas en la investigación, los resultados obtenidos y sus aportaciones.

Esta tabla nos puede ayudar a comparar y contrastar los resultados de diversos estudios (tabla 3.3).

Tabla 3. 3 Síntesis de estudio para la revisión bibliográfica.

Autor y año	Propósito	Muestra	Resultados	Aportaciones

Fuente: Propia.

3.3.2 Parámetros de diseño

Al momento de diseñar secadores se tiene una gran cantidad de variables de diseño a considerar, tales como el área de transferencia de calor, las características del material a secar, el tamaño del equipo, la cantidad de humedad a remover, por mencionar algunas (Nonhebel y Moss, 2002; Jangam et al., 2010).

En el caso particular de los secadores solares, además de las variables

mencionadas, influyen otras como la localización del secador, la disponibilidad del recurso solar, la economía del sistema y el tipo de colector a usar, el cual suele ser un caso de estudio común en los secadores solares (Adepoju et al., 2013; Amedorme et al., 2013; Belessiotis y Delyannis, 2011; Idiongo Bassey y Garba, 2013)

Para definir las variables de diseño se tomaron como referencia la capacidad volumétrica de la cámara de secado, el producto a secar del cual se realizó una investigación para considerar las características convenientes para ser deshidratado y además se consideraron las características del sitio de experimentación ya que el funcionamiento de los equipos solares se ven afectados por la situación geográfica.

3.3.2.1 Volumen total

Para el diseño propuesto del prototipo de secador solar rotatorio, se estimó una cantidad máxima de 50 Kg de producto, esto debido a que es el peso aproximado a los costales que utilizan los cafetaleros de la región. Es por ello que a partir de este dato se basaron los cálculos para el dimensionamiento de la cámara de secado, considerando como producto a deshidratar granos frescos de café pergamino.

Para poder calcular el volumen total del producto en 50 kg, fue necesario conocer algunas propiedades de este como por ejemplo la densidad del producto (tabla 3.4). Utilizando la ecuación 3.1, se puede determinar el volumen del mismo.

$$m = (\rho * v) \tag{3.1}$$

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

Tabla 3. 4 Densidad de los granos frescos de café.

Producto	Densidad (kg/m^3)
Café (granos frescos)	620

Fuente: <http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041S09.htm>

Despejando la ecuación 3.1, se determina el volumen total ocupado en 50 kg de producto, por tanto, se pudo determinar que a 50 kg de producto le corresponde un volumen de 0.080 m^3 .

Sin embargo, (Sper Berna y Torres Córdova, 2009), mencionan en su trabajo que lleva por título “Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio”, que en base a los estudios realizados la cantidad de carga ideal en los secadores rotatorios con el cual el producto se deshidrata con mayor homogeneidad se encuentra en el rango de 30 - 40% del volumen total, es por ello que 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 total del producto. Con lo cual el volumen total del contenedor debe ser de 0.2 m^3 .

En este proyecto de investigación se consideró la re-utilización de materiales disponibles en la región, por tanto, se partió de la idea de re-utilizar barriles de acero en el cual se comercializa el aceite vegetal para los procesos alimenticios, cuyas características se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Características del contenedor metálico.

Característica	Descripción
Tipo	Tanque
Diámetro	0.60 m
Altura	0.88 m
Peso	18.6 kg
Color	Varios
Material	Acero cedula 20
Capacidad	200 litros
Tipo de tapa	Tapa y Aro

Fuente: <https://www.casamyers.com.mx/item/24900010/>

Tomando en consideración las dimensiones del contenedor y con ayuda de la ecuación 3.2, se determinó el volumen total del contenedor, siendo este de $0.248m^3$.

$$v = \pi * r^2 * h \tag{3.2}$$

Sabiendo que $0.161m^3$ es el volumen total del producto, dicho que equivale al 40% del volumen total de la cámara de secado, por tanto, el volumen total requerido de la cámara de secado corresponde a $0.2 m^3$.

Aplicando la regla de las tres simples se determinó que la cantidad total de barriles a emplear corresponde a un solo barril.

3.3.2.2 Aislante optimo

El cálculo del espesor óptimo del aislante puede ser determinado mediante el uso de la ecuación 3.3 (“Metodología de cálculo de espesores óptimos de aislamiento térmico,” 2007).

$$d = \lambda_B \left(\frac{\theta_M - \theta_L}{q} - \frac{1}{h_i} - \frac{1}{h_a} \right) \quad (3.3)$$

Donde, d es el espesor del aislamiento (m), λ_B la conductividad térmica operacional del aislamiento (W/m·K), θ_M la temperatura del medio (°C), θ_L temperatura ambiente (°C), q es la densidad de flujo de calor (W/m), h_i el coeficiente de transmisión de calor en interior (W/m²·K) y h_a el coeficiente de transmisión de calor en exterior (W/m²·K).

Para facilitar el proceso de cálculo de aislante óptimo, se utilizó la ayuda del software en línea Arm Win, el cual es un programa de cálculo profesional de espesores de aislantes, dicho programa arrojó un resultado donde indica que el espesor óptimo de aislante para cubrir la cámara de secado debe ser de 4.8 cm de poliuretano de vaciado.



Figura 3. 1 Apreciación del recubrimiento de poliuretano en la cámara de secado.

Fuente: propia.

3.3.2.3 Diseño del colector solar

Una de las partes más importantes de los secadores solares, es el colector solar, el cual es un dispositivo empleado para captar la energía irradiada por el sol y convertirla en energía térmica. Para el caso de los calentadores solares el área de captación de la energía será el área de la superficie en donde se da la transferencia de calor también conocida como área efectiva.

El trabajo de investigación para el desarrollo del prototipo, propone la implementación de tubos al vacío de baja presión, cuyas características se presentan en la tabla 3.6.

Para determinar el área efectiva se hizo uso de la ecuación (3.4) en donde se emplearon las características presentes en la tabla anteriormente mencionada, dando como resultado un requerimiento de un área efectiva de 5.18 m^2 .

$$A_{efec} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)}{G_{solar} \cdot \eta_{asumida} \cdot t} \tag{3.4}$$

Donde m es la cantidad de aire a calentar (kg), C_p el calor específico del agua (KJ/Kg °C), T_f , la temperatura del aire caliente (° C), T_i la temperatura del aire frío (°C), G_{solar} es la Radiación solar promedio (kWh/m²) y t el tiempo necesario para calentamiento del fluido en el tubo (s).

Tabla 3. 6 Información técnica (tubos de vidrio solar al vacío TYY-AA).

Modelo	Tubos de vidrio solar al vacío TYY-AA
Material de vidrio	Vidrio boro silicato 33 de alta calidad
Diámetro del tubo de vidrio	90 mm
Diámetro del tubo interno del vidrio	50 mm
Espesor de vacío	5 mm
Longitud	1800 mm

Espesor de las paredes del vidrio	1.8mm
Peso de un solo tubo	2.0kg
Material de absorción	Cobre
Coefficiente de absorción	α 0.90-0.93
Resistencia la viento	30 m/s
Tiempo de vida (años)	15 años

Fuente: <http://www.duery.cl/tubos-al-vacio/137-tubo-al-vacio-58-1800.html>

Una vez obtenida el área efectiva del colector solar fue necesario determinar el número total de tubos, para lo cual se empleó la ecuación 3.6, sin embargo, antes de proceder a resolver dicha ecuación se obtuvo el área efectiva del colector, para lo cual se utilizó la ecuación 3.5, donde el resultado de esta operación fue de un área efectiva requerida de a 5.18 m².

Al sustituir los valores obtenidos de la ecuación 3.5 en la ecuación 3.6, se obtuvo como resultado un total de 18.32 tubos por lo cual se aproximó al número próximo superior en este caso 19 tubos.

$$A_{efec} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)}{G_{solar} \cdot \eta_{asumida} \cdot t} \quad (3.5)$$

Donde m es la cantidad de fluido a calentar (Kg), C_p el calor específico del agua (KJ/Kg °C), T_f la temperatura del aire caliente (° C), T_i la temperatura del aire frío (° C), G_{solar} la Radiación solar promedio (KWh/m²) y t es tiempo necesario para calentamiento del agua en el tubo [s].

$$N_{tubos} = \frac{A_{efec}}{\pi \cdot D_i \cdot L_{ta}} \quad (3.6)$$

Donde A_{efec} es el área efectiva del colector (m²), D_i el diámetro del colector (m) y L_{ta} es la longitud del tubo (m).

3.3.2.4 Diseño del sistema rotatorio

El torque o par, es una fuerza de giro; Donde, la fuerza de giro de la flecha de salida del motorreductor; es también la fuerza de giro en la flecha de un motor. Este torque o par mezclado con un tiempo de realización, aplicación o ejecución se expresa mediante ecuación 3.7 misma empleada para el cálculo de del torque requerido en el sistema, en el cual el resultado de dicha operación indica que el torque necesario debe ser 49.05 N-m.

$$T = F * R \tag{3.7}$$

Donde T es el torque o par (Newton – metro), F la fuerza tangencial (N) y R la distancia al centro de giro (m).

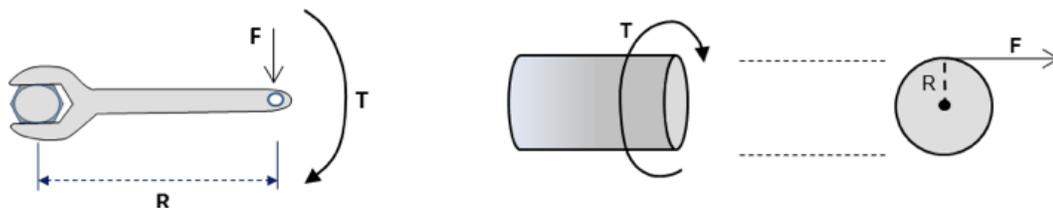


Figura 3. 2 Ejemplificación del torque de un motor.
Fuente: <http://www.potenciaelectromecanica.com>

Un motor eléctrico tiene una determinada potencia en HP y tiene una cierta velocidad de operación a la cual gira la flecha de salida dada en revoluciones por minuto (RPM). Estas dos características: velocidad y potencia llevan aparejado un cierto torque que puede liberar el motor. Es precisamente el torque lo que permite girar o no una determinada carga, cuanto más alto el par más grande será la carga que se pueda girar. El que tan rápido podamos hacerlo dependerá de la potencia del motorreductor. Las dos características están interrelacionadas y dependen una de la otra.

Esta combinación de potencia, par y velocidad en un motor o motorreductor está regida por la ecuación 3.8, la cual fue tomada para poder determinar la potencia necesaria en el motorreductor para poder mover el cilindro rotatorio con un peso neto de 100 kg, determinándose así que la potencia requerida es de 0.20 HP.

$$T = \frac{HP * 716}{RPM} \quad (3.8)$$

Donde T es torque (N-m), HP la potencia (caballos de fuerza) y RPM la velocidad de giro de la flecha del motor o reductor (revoluciones por minuto).

De esta forma, una vez obtenidos las especificaciones necesarias para el sistema motorreductor se contactó a Dayton Motors y dichas especificaciones se les fueron entregadas para que la empresa proporcionara el motorreductor en base a esas especificaciones. Por lo consiguiente Dayton Motors recomendó el modelo 1LPP7A, las características de dicho motorreductor pueden ser encontradas en el Anexo 1.

3.3.2.5 Procesamiento del diseño en SolidWorks

Para el proceso de diseño se optó por utilizar un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software empleado fue SOLIDWORKS 2016, ya que este software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto y además ofrece la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño de una forma eficaz y profesional.

El proceso de diseño se basó en el método de diseño ascendente, el cual es método tradicional en este tipo de procesos. Acorde a los cálculos matemáticos previos obtenidos, primero se diseñaron y modelaron las piezas y después se insertaron en un ensamblaje y se utilizaron relaciones de posición para colocarlas y así obtener el diseño final del secador solar rotatorio.

3.4 Principios de construcción del secador solar rotatorio

Para evitar inconvenientes al momento de la construcción, se crearon procedimientos los cuales aseguraron un buen proceso de construcción. La metodología empleada se basó en seccionar los componentes del sistema y construir cada uno de ellos de forma independiente y una vez finalizados cada uno de los sub-sistemas se procedió a realizar el ensamble de cada uno de estas partes.

Las partes principales en las que se secciono el secador solar rotatorio son las siguientes enlistadas a continuación:

1. Cámara de secado, componente donde los granos son colocados para que el proceso de secado se lleva a cabo.
2. Colector solar, dispositivo diseñado para captar la energía solar y convertirla en energía térmica.
3. Soportes, estructura que soporta a la cámara de secado.
4. Conductos, tuberías y otros aparatos.
5. Equipo de inyección y extracción de calor, para transferir o extraer aire caliente al material contenido en la cámara de secado.
6. Medios para mantener las condiciones adecuadas en el proceso de secado.
7. Dispositivos y sistema de rotación.

3.4.1 Maquinado del sistema

3.4.1.1 Cámara de secado

El proceso de construcción de la cámara de secado dio inicio con la fabricación de los elevadores de granos en el cual basados en la investigación realizada por (Van Puyvelde, 2009) y presentada en 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, se optó por utilizar el modelo de elevador E presentado en la figura 3.3, debido a que dicho modelo presenta un rango de retención de material más alta, lo cual implica mayores beneficios en el proceso de secado de granos.



Figura 3. 3 Ilustración de los elevadores investigados.

Tabla 3. 7 Detalles de los diferentes segmentos de los elevadores.

	Tamaño del segmento (cm)	Inclinación (°)
Elevador E	15	180
	7	135
	5	90
	7	45

Posterior a la implementación de los elevadores en la cámara de secado, se soldaron los volantes solidarios los cuales captan la transmisión de potencia hacia el cilindro rotatorio. Al término de esto se realizó el recubrimiento con una chapa metálica cedula 20, la cual cubrió el cilindro interior dejando un espacio anular de 5 cm entre cada cilindro para después recubrir dicho espacio con espuma de poliuretano para vaciados en una proporción 50/50 de componentes A y componentes B.

3.4.1.2 Colector solar y soportes

El área de captación solar, se encuentra conformada por un arreglo de 20 tubos al vacío soportadas en una estructura de PTR de 1 ½ pulgadas por la cual en su interior se le fue colocada un serpentín de acero galvanizado de ½ pulgada por el cual circula un flujo de aire forzado el cual es calentado a medida que fluye a través del arreglo de tubos al vacío.

3.4.1.3 Conductos y tuberías

Los ductos que recorren dentro del sistema de captación solar fueron realizados a partir de acero galvanizado de ½ pulgada, los extremos que conectan hacia la cámara de secado y a la entrada de aire frío, cuentan con una ampliación a un tubo de acero galvanizado 1 pulga y al extremo opuesto se realizó la misma conexión esto con la finalidad de poder acoplar los extractores e inyectores de aire.

3.4.1.3 Equipo de inyección y extracción 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. Es importante conocer cuál

debe ser el flujo de masa de aire que se necesita para extraer la humedad adecuada del producto ya que la etapa del secado es de gran importancia para garantizar una buena calidad del mismo.

Orozco Hincapié y Bedoya Loaiza, 2007 desarrollaron un modelo analítico de cálculo para el flujo de masa y caudal de aire y lo valida con resultados obtenidos de experiencias previas de las referencias.

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 .

$$\dot{Q}_w = \eta_s * \dot{Q}_{a1} \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_w * (Cp_w * \Delta T_w + h_{fg})}{\eta_s * Cp_{a1} * \Delta T_{a1}} \quad (3.10)$$

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_{a1} 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:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{producto}}{t} (w_o - w_f) \quad (3.11)$$

En la anterior ecuación $m_{producto}$ 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 3. 8 Flujo másico de aire para secar la respectiva masa de café.

Masa de café (kg)	Flujo másico de aire (kg/s)	Caudal de aire (m^3/s)
100	0.7	0.583
125	0.87	0.725
150	1.04	0.867
175	1.22	1.017
200	1.39	1.158
225	1.57	1.308
250	1.74	1.45
275	1.91	1.592
300	2.09	1.742

Fuente: (Orozco Hincapié y Bedoya Loaiza, 2007).

Es por ello que a partir de la determinación del flujo másico mínimo requerido por sistema de inyectores y extractores se localizaron y adquirieron dos

sopladores Makita UB1103 los cuales proporciona un caudal de aire máximo de $4.10 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales cubren satisfactoriamente dicho flujo másico requerido.



Figura 1. Soplador Makita UB1103.

Fuente: <https://www.makitatools.com/es/products/details/UB1103>.

3.4.1.4 Sistema de control

El sistema de control se encuentra conformado por un microcontrolador Arduino Uno (figura 3.4) que cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio.



Figura 3. 4 Microcontrolador Arduino.

Fuente: <https://www.dfrobot.com>

EL microcontrolador se encuentra programado para detectar la señal de tres sensores de humedad y temperatura DTH22 (figura 3.5) con un rango de

temperatura entre -40 a 125°C, con una precisión de 0.5°C, el rango de medición de humedad se sitúa entre 0 a 100%, con precisión del 2-5%, y cuenta con una frecuencia de muestreo de 2 muestras por segundo (2 Hz), los cuales se encuentran distribuidos en distintas secciones del sistema, uno a la entrada del colector solar, otro a la salida del mismo y el ultimo se encuentra ubicado al interior de la cámara de secado.

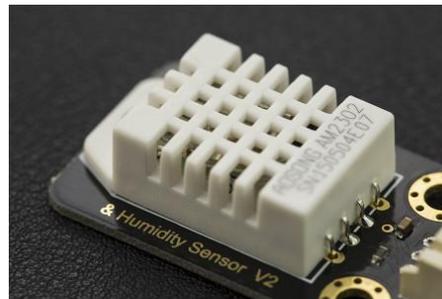


Figura 3. 5 Sensor de humedad y temperatura DTH22.
Fuente: <https://www.dfrobot.com>

El proceso de inyección y extracción de aire caliente, se encuentra regulado mediante dos válvulas solenoide Nc ½ de Arduino (figura 3.6), construida en polipropileno, alimentada con una tensión de 12 V, la cual permite el paso de hasta 28 l/min.



Figura 3. 6 Válvula solenoide Nc ½ de Arduino.
Fuente: <https://www.dfrobot.com>

3.4.1.5 Sistema de rotación

El movimiento de rotación de la cámara de secado es generado a partir de un motorreductor Dayton modelo 1LPP7A de ¼ de HP, el cual transmite un torque de 67.8 N-m a través de un sistema de transmisión directa por medio de un Coll Roll de 1 pulgada, acoplado en un extremo al centro de los volantes solidarios y el otro al eje del motorreductor.

El motorreductor se encuentra apoyado sobre el mismo soporte sobre el cual se encuentra la cámara de secado, esto con la finalidad de poder tener un movimiento transversal para la carga, descarga o mantenimiento del equipo.



Figura 3. 7 Sistema motorreductor acoplado a la cámara de secado.
Fuente: propia.

3.4.2 Características generales del sistema

El principio de funcionamiento del prototipo de secador solar rotatorio para el deshidratado de granos, se basa en el efecto invernadero causado cuando una parte de todo el espectro de la radiación solar incidente atraviesa la doble cubierta de los tubos al vacío; de la cual una fracción es absorbida creándose una trampa térmica dentro de los tubos.

La radiación solar absorbida por los tubos al vacío durante las horas solares, elevan la temperatura del aire contenido en el interior para luego ser transportado a través del serpentín hacia la cámara de secado, lugar donde se lleva a cabo el deshidratado del producto. Cabe mencionar que en el interior del sistema se cuenta con un sistema de control debido a que las operaciones de secado en granos la temperatura no debe de exceder de los 55 °C, es por ello que una vez sobrepasando estos valores un sistema de extracción de aire caliente es activado mediante un sistema de control a través de una programación en un microcontrolador Arduino Uno y de igual forma cuando los sensores instalados en la cámara de secado detectan una temperatura inferior a los 40 °C un sistema de inyección de aire caliente es activado manteniendo así una temperatura optima en el interior de la cámara de secado durante las

operaciones de secado.

El prototipo de secador rotatorio se encuentra soportado por una estructura metálica de perfil tubular PTR 2 ½ en forma de rectangular, a partir de perfiles angulares soldados entre sí. La cámara rotatoria, gira a una velocidad de 3 rpm a través de un mecanismo motor reductor, soportado sobre ruedas de caucho ancladas a la estructura, el sistema cuenta con una manivela para la inclinación de la cámara de secado lo cual permite la carga o descarga del material para las operaciones de secado y de mantenimiento. La cámara de secado se encuentra conformada por un doble cilindro metálico aislado. El cilindro interno construido a partir de un barril de acero que cuenta con un radio de 0.30 m, seguido de un recubrimiento de poliuretano de 5 cm de espesor y por último un recubrimiento con una placa de acero cedula 20 y con una longitud de 1m.

3.5 Metodología de evaluación del secador solar rotatorio

La finalidad de la evaluación del sistema se encuentra enfocada a determinar el rendimiento del dispositivo, basado en un proceso experimental simple, eficiente y sobre todo fiable. Los parámetros tomados en consideración para la parte experimental en la evaluación de rendimiento del secador solar rotatorio son la radiación solar incidente, velocidad del viento y temperatura del ambiente. Dichos datos fueron tomados de los valores registrados por la estación meteorológica Vantage Pro 2.



Figura 3. 8 estación meteorológica Vantage Pro 2.
Fuente: <http://ecuadorgps.com>

A continuación, se indican las consideraciones y especificaciones para la fase experimental de las pruebas in situ, dicho proceso experimental está dividido en dos pruebas fundamentales las cuales son:

- Prueba en vacío
- Prueba con carga

3.5.1 Prueba en vacío

La realización de la prueba en vacío del prototipo del secador solar rotatorio, como su nombre lo indica, se debe realizar sin el producto que se va a secar, esto con la finalidad de determinar el correcto o no funcionamiento del sistema de secado. La prueba en vacío contempla una duración de 8 horas continuas de trabajo por día, con lo cual se puedan monitorear los parámetros de humedad y temperatura del aire al interior de la cámara rotatoria con el prototipo operando sin carga de café al interior de la cámara de secado.

Para dicha prueba, se emplea el microcontrolador Arduino uno con los sensores DHT22 antes mencionados en la sección 3.4. Dichos sensores capturan los valores de humedad y temperatura tanto en la cámara de secado como en el colector solar con dichos registros se logran descartar errores por factores climatológicos o externos al sistema.

3.5.2 Prueba con carga

La prueba con carga (con producto en el interior de la cámara de secado), tiene como objetivo la recopilación de datos como la variación de humedad y temperatura tanto en la cámara de secado como en el colector solar, 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 los intervalos de medición contemplan una duración de 8 horas por día, además se contempla el uso de diferentes muestras de café pergamino de la variedad catimor.

Con el fin de determinar la variación de humedad contenida en el producto a lo largo del proceso de secado, se debe de retirar 100 gramos del producto del interior de la cámara de secado en intervalos de una hora, la muestra tomada de manera aleatoria del interior del secador debe ser analizada en la termobalanza Velab 50-5, esto con la finalidad de poder obtener el contenido de humedad en la muestra y con esto poder realizar las curvas de secado del

producto que a su vez ayudaran al estudio de la factibilidad del prototipo.



Figura 3. 9 Balanza electrónica para medir humedad. Modelo VE-50-5
Fuente: www.velaquin.com.mx

3.5.3 Preparación del producto

Antes de ingresar el grano de café al interior de la cámara de secado, este es inspeccionado minuciosamente a fin de remover las impurezas que pudiese contener. Una vez realizada esta operación la masa total del producto es pesada y posteriormente a esto el producto es ingresado a la cámara de secado.

3.9 Conclusión

En este apartado se estableció el método que permite evaluar el sistema de secado, con el cual se determine la eficiencia del sistema, tomando en cuenta la

influencia de ciertas variables, parámetros de diseño y de operación del secador solar que intervienen en el proceso de secado.

Por otro lado, se establecieron las ecuaciones particulares para determinar el correcto diseño, construcción y evaluación del prototipo. 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.

“Cuando las generaciones futuras juzguen a las que vinieron antes respecto a temas ambientales, tal vez lleguen a la conclusión de que no sabían: evitemos pasar a la historia como las generaciones que sí sabían, pero no les importó”

(Mikhail Gorbachev)

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Introducción

Este capítulo tiene como finalidad de dar a conocer de forma detallada los resultados obtenidos del diseño y construcción del prototipo de secador solar rotatorio desarrollado en el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, así como los resultados de las pruebas de secado realizadas con el prototipo de secador solar.

Para dicho estudio se realizó un análisis comparativo, en donde se evalúan los ratios de secado de dos métodos de secado de granos, el primero que es el método tradicional de secado, comúnmente llamado secado al sol (Romo y Balaña, 2007); y el segundo empleando el prototipo de secador solar rotatorio propuesto, el cual se conforma por las partes descritas en la figura 4.2.

En la primera fase de la evaluación, se obtuvo por método experimental el porcentaje del contenido de humedad inicial y final de los granos de café a través de una termobalanza, con lo cual se lograron obtener las curvas de secado del producto. También estos experimentos se realizaron con el secado al sol de los granos de café. Para estas pruebas se emplearon granos de café pergamino de la variedad catimor cosechados en Nueva Palestina municipio de Ángel Albino Corzo perteneciente a la región frailesca.

En una segunda fase se realizó la evaluación del comportamiento del proceso de calentamiento del fluido (aire) a través de los componentes del sistema, esto con ayuda de sensores de humedad y temperatura, con lo cual se lograron registrar los valores máximos de humedad y temperatura del aire al interior de la cámara de secado, así como del colector solar, con lo cual se consiguieron establecer los parámetros de operación del sistema para el correcto deshidratado del producto.

4.2 Resultados del diseño del prototipo

El diseño se basó en la capacidad de poder deshidratar 50 kg de granos de café. Dicho parámetro fue establecido como punto de referencia al momento de realizar el diseño, debido a que esta cantidad corresponde al peso promedio de un saco de café pergamino.

Así pues, los resultados de diseño arrojan que para poder deshidratar 50 kg de café es necesario contar con un volumen en la cámara de secado de 0.2 m^3 , dicho volumen se logró cubrir con un contenedor metálico de 0.248 m^3 . Para esta estimación del volumen se consideró la recomendación señalada por (Sper Berna y Torres Córdova, 2009), que se debe ocupar únicamente entre el 30 % y el 40 % del volumen de la cámara de secado con el producto a deshidratar, para garantizar un secado homogéneo y la correcta remoción del grano dentro de la cámara.

Además de esto, también fue necesario conocer el área efectiva para la captación de energía térmica y el número de tubos al vacío requeridos en el sistema, aunado a esto para evitar las pérdidas por transferencia de calor hacia el exterior se determinó el espesor óptimo del aislante utilizado. Así también se determinaron las características necesarias del dispositivo motorreductor. Los resultados las operaciones anteriormente citadas se presentan a continuación en la tabla 4.1.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tabla 4. 1 Descripción de los parámetros de diseño.

Parámetro de diseño	Ecuación	Resultado
Área de captación	$A = \frac{m * C_p * (T_f - T_i)}{G_{solar} * \eta_{asumida} * t}$	5.18 m ²
Número de tubos	$N_{tubos} = \frac{A}{\pi * D_i * L_{ta}}$	20 tubos al vacío
Motorreductor	<p style="text-align: center;">Torque: $T = F * R$</p> <p style="text-align: center;">Potencia: $Hp = \frac{T * RPM}{716}$</p>	<p style="text-align: center;">49.05 N-m.</p> <p style="text-align: center;">0.20 HP</p> <p style="text-align: center;">El motorreductor que mejor se acoplo a estas características fue el Dayton modelo 1LPP7A de 6 RPM y 0.25 HP</p>
Aislante	$d = \lambda_B \left(\frac{\theta_M - \theta_L}{q} - \frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_a} \right)$	<p style="text-align: center;">4.8 cm</p> <p style="text-align: center;">Espuma de poliuretano Coeficiente de conductividad térmica: 0,023 W/(m·K)</p>

Fuente: propia.

En cuanto al flujo de aire requerido para el deshidratado de los granos de café se tomó como referencia lo reportado por Orozco Hincapié y Bedoya Loaiza, 2007, donde presentan una lista del flujo de aire necesario en relación a la masa de café para deshidratar, a partir de esto se usó el método de

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

extrapolación de datos determinándose así el caudal de aire mínimo necesario siendo este de $0.299 \text{ m}^3/\text{s}$.

El diseño del sistema de control, se encuentra constituido por un conjunto de dispositivos electrónicos, específicamente por una tarjeta programable de software libre Arduino uno, un módulo de relevadores de dos canales a 5 v, una Pantalla Lcd Keypad Shield 16x2, dos sensores de humedad y temperatura DHT22, los cuales son alimentados por una fuente de poder de 5 v. Las conexiones de dichos elementos se encuentran presentes en el diagrama electrónico de la imagen 4.1.

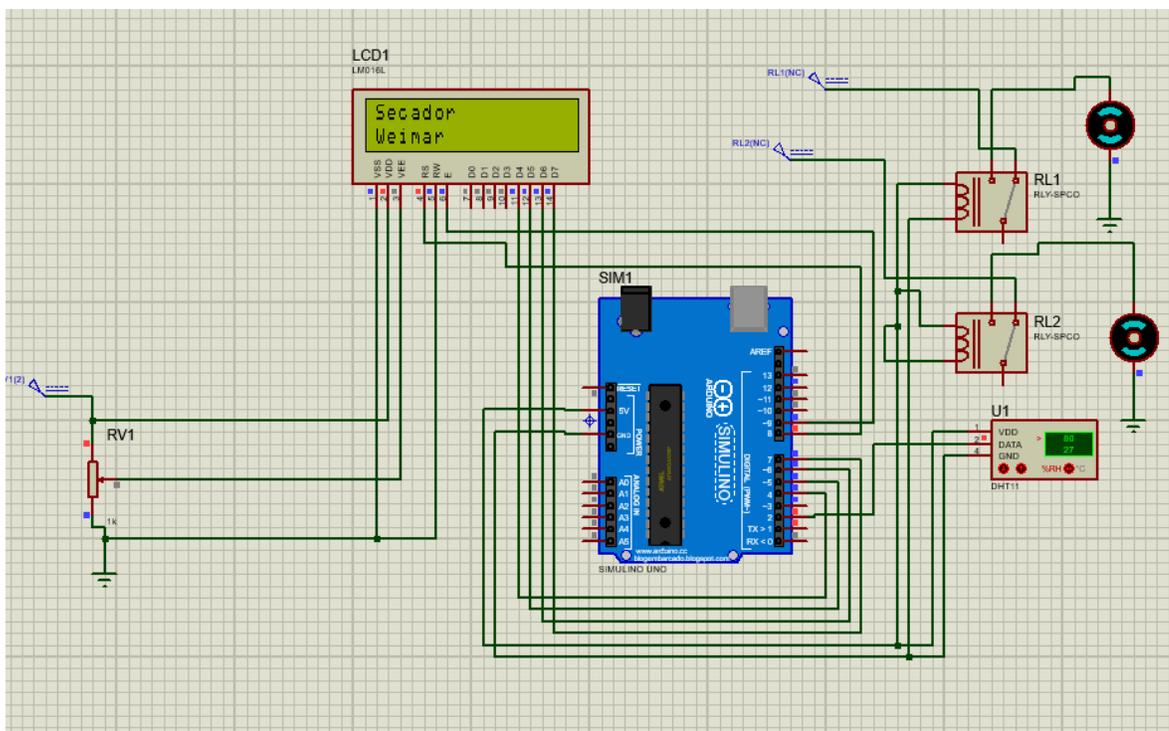


Figura 4. 1 Diagrama del sistema de control de humedad y temperatura.
Fuente: propia.

En cuanto a las condiciones de programación por la cual se rige dicho sistema de control, se encuentran establecidas en los diagramas de flujo que se muestran en las figuras 4.2 y 4.3.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La figura 4.2, presenta el diagrama de flujo de una de las condiciones del sistema de control, en la cual se describe el proceso de control de la humedad relativa del aire al interior de la cámara de secado.

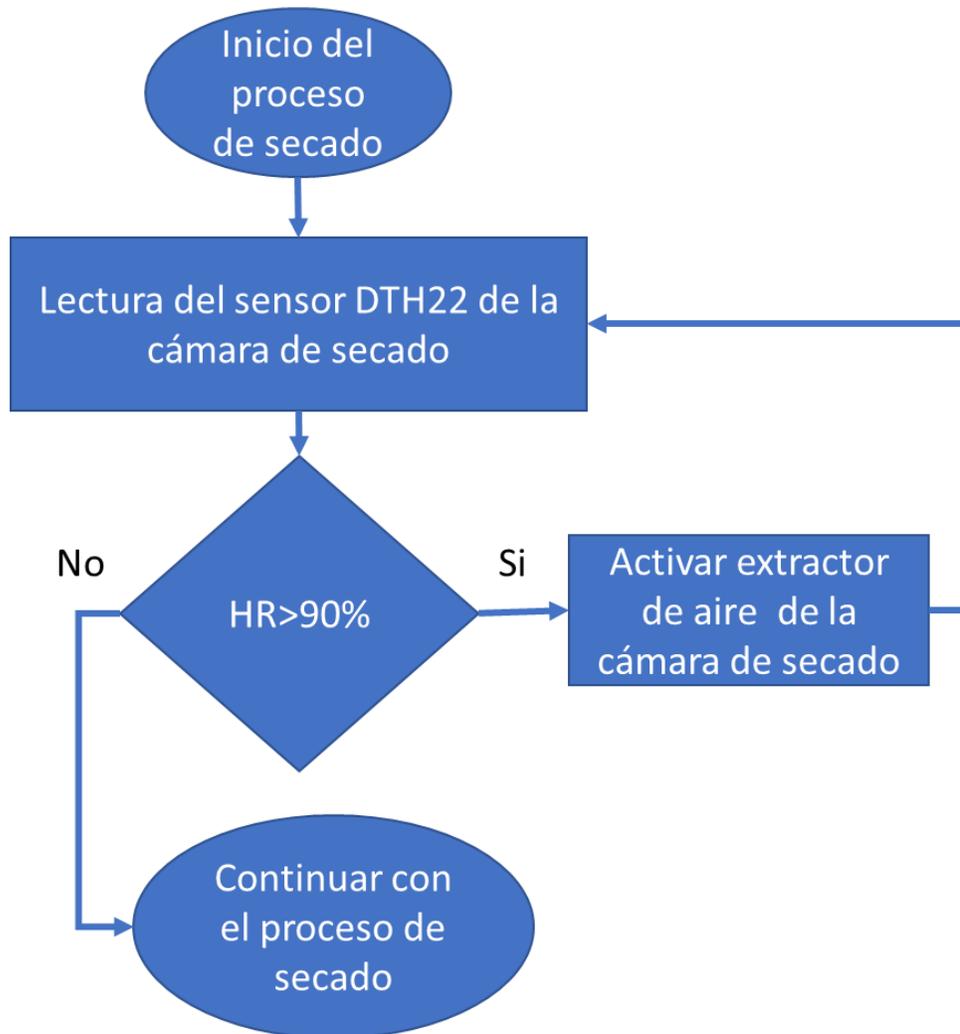


Figura 4. 2 Diagrama de flujo del sistema de control de la humedad relativa al interior de la cámara de secado.

Fuente: propia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La segunda condición del sistema de control, se presenta en la figura 4.3 en la cual se describe el proceso de control de la temperatura del aire al interior de la cámara de secado.

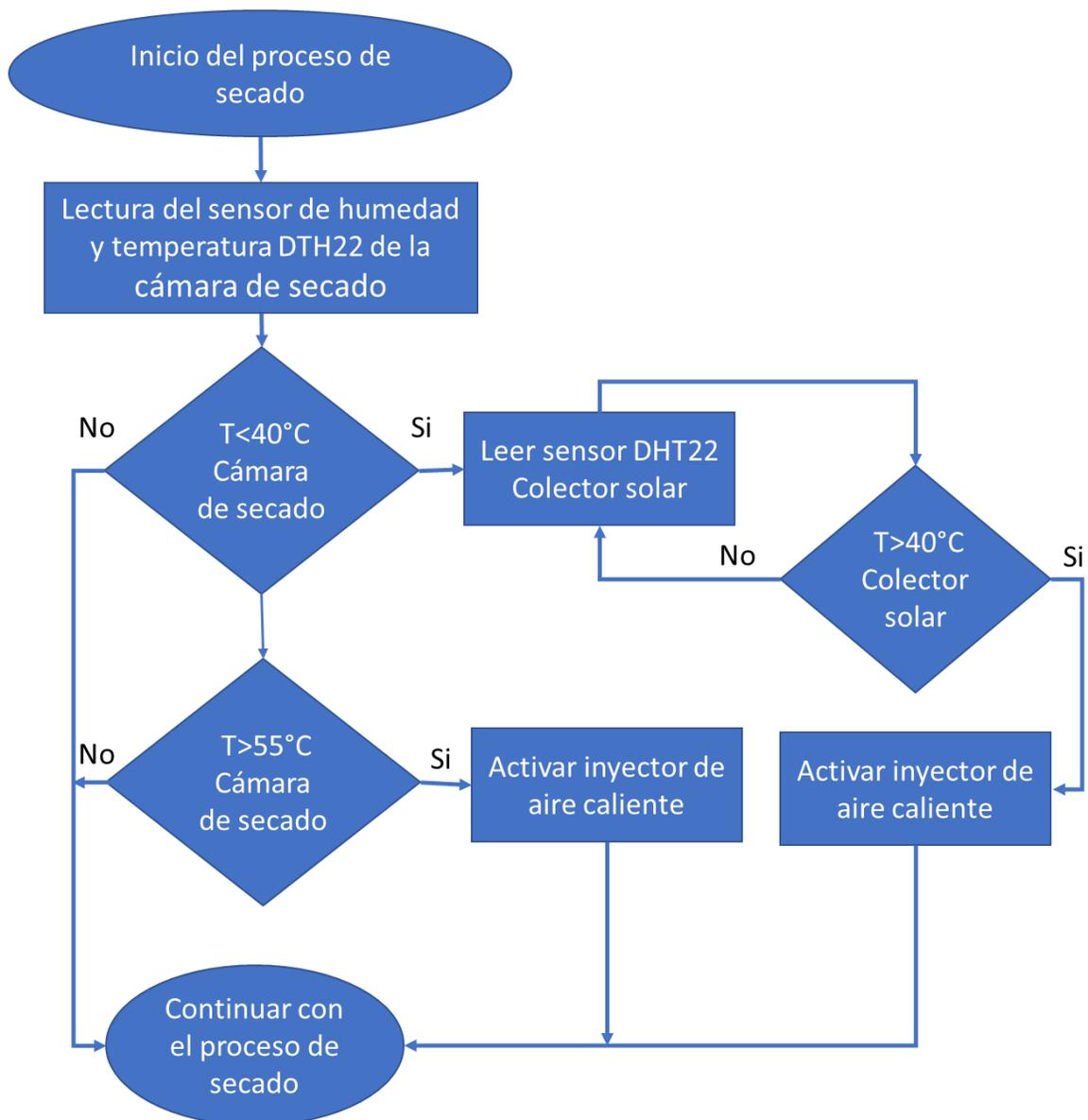


Figura 4. 3 Diagrama de flujo del sistema de control de la temperatura del aire al interior de la cámara de secado.

Fuente: propia.

4.3 Análisis de los resultados del proceso de construcción del prototipo

El proceso de construcción del prototipo de secador solar rotatorio estuvo basado en los resultados del diseño presentados en la sección 4.2, las partes que conforman al prototipo de secador solar rotatorio se presentan a continuación en la figura 4.4.

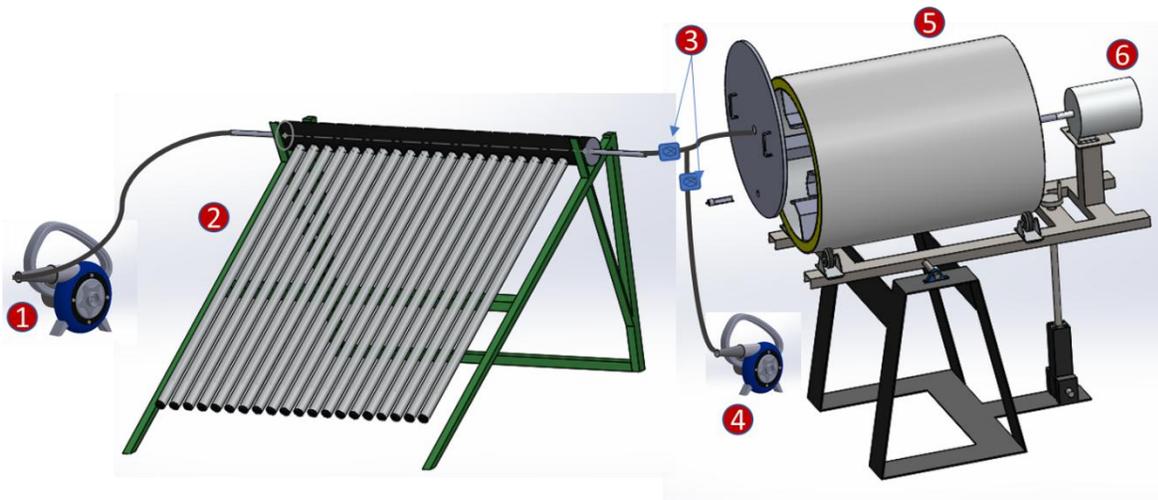


Figura 4. 4 Componentes principales del secador solar rotatorio. 1) Soplador de aire, 2) Colector solar, 3) Cámara de secado, 4) Extractor de aire, 5) Cámara rotatoria de secado, 6) Motorreductor.

El proceso de construcción y ensamble del prototipo, como se observa en la figura 4.5 y 4.6, fue llevada a cabo en el taller de usos múltiples del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.



Figura 4. 5 Construcción de la cámara rotatoria de secado.

Fuente: propia.



Figura 4. 6 Construcción del sistema interno para el flujo forzado de aire del colector solar.

Fuente: propia.

A continuación, en la figura 4.7 se presenta el prototipo ensamblado en el sitio de monitoreo, listo para su operación.



Figura 4. 7 Secador solar rotatorio ensamblado.

Fuente: propia.

4.4 Análisis del comportamiento de la humedad relativa en el sistema de secado sin producto

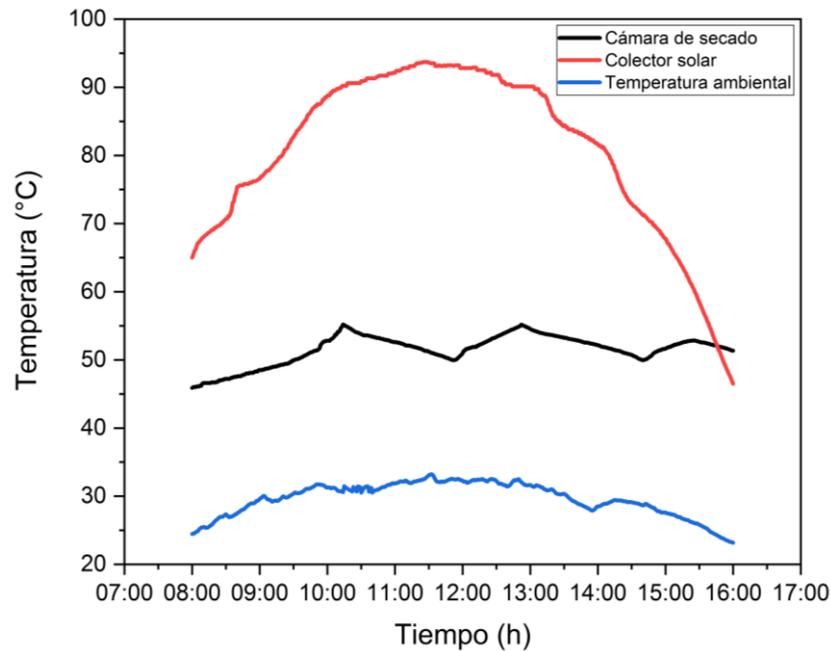
Una vez construido, se hicieron pruebas en vacío, para determinar el correcto o no funcionamiento de las partes del sistema de secado. Las pruebas en vacío se realizaron en un periodo de 8 horas continuas de trabajo por día, con lo cual se pudieron descartar fallas mecánicas, eléctricas o térmicas de todos los subsistemas del prototipo.

Dicha validación consistió en monitorear los parámetros de humedad y temperatura del aire al interior de la cámara rotatoria con el prototipo operando en vacío (sin carga de café al interior de la cámara de secado), con lo cual se corroboró el correcto funcionamiento del sistema de control.

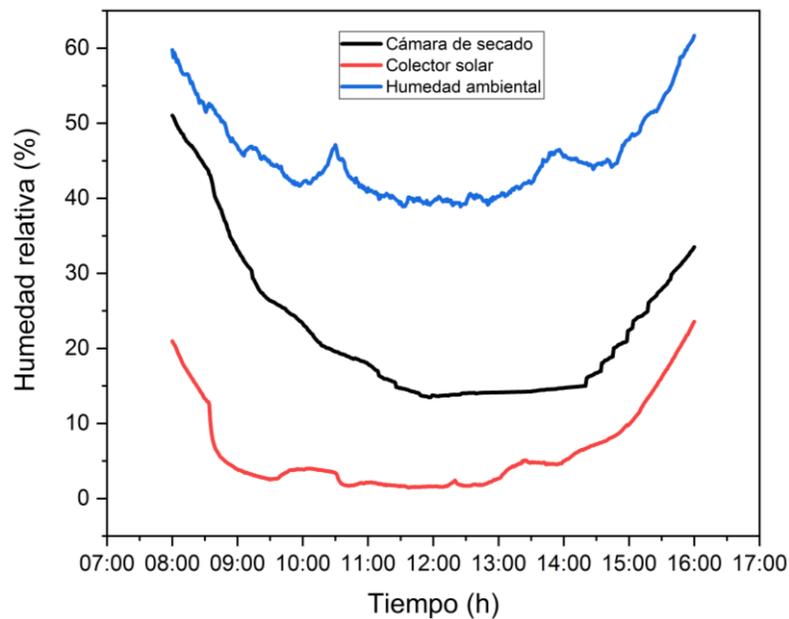
Las gráficas 4.1 y 4.2 que se presentan a continuación, muestran los valores de humedad y temperatura obtenidos durante las pruebas en vacío. En el cual, al analizarlas se pudo determinar que la variación de temperatura se comporta acorde a las condiciones establecidas en el sistema de control.

Como puede apreciarse en la gráfica 4.1, después de un tiempo de 2 horas 14 minutos de haber iniciado la prueba en vacío la temperatura del aire al interior de la cámara de secado alcanzó un máximo de 55.2 °C, a partir de ese instante el sistema de control interrumpió la inyección de aire caliente hacia la cámara de secado, asegurando con esto mantener la temperatura por el debajo del rango preestablecido (55 °C), así también se observa que una vez que la temperatura desciende por debajo de los 50 °C los inyectores de aire se activan e ingresan el aire caliente proveniente del colector, elevando la temperatura hasta mantener el rango óptimo establecido por el sistema de control.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES



Gráfica 4. 1 Temperatura del aire al interior del colector solar, cámara de secado y ambiente durante la prueba en vacío.
Fuente: propia.



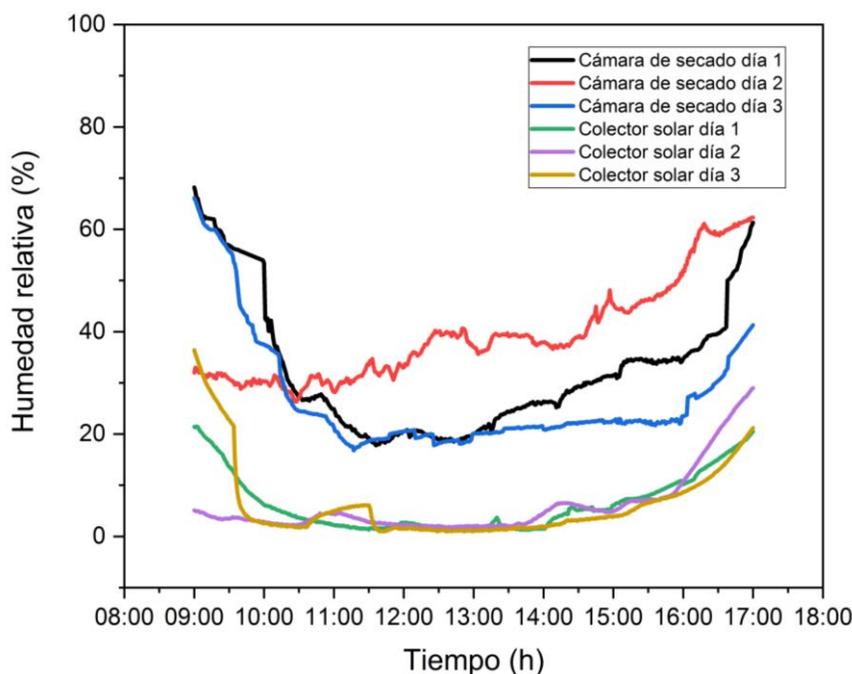
Gráfica 4. 2 Variación de la humedad relativa del aire en la prueba en vacío en el colector solar, cámara de secado y ambiente.
Fuente: propia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En relación a los porcentajes de humedad que se registran en la gráfica 4.2 se aprecia que los niveles en los porcentajes de humedad, no exceden el 90 % por tal motivo el sistema de control detecta que este valor no excede lo estipulado en su programación, por ende, el dispositivo no realiza ninguna acción en los mecanismos de extracción de humedad.

4.5 Análisis del comportamiento de la humedad relativa en el sistema de secado con producto

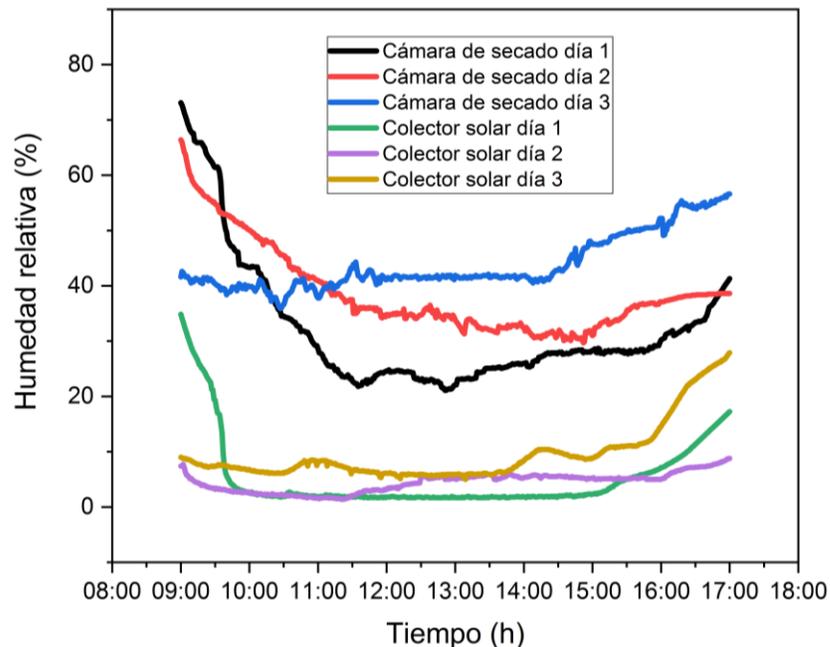
Para pruebas experimentales de secado se emplearon dos lotes de granos de café pergamino, para la primera prueba experimental de secado que comprendió desde el 5 al 7 de noviembre de 2018, se empleó un primer lote con un total de 48.40 kg, para la segunda prueba de secado, se empleó el segundo lote con un total de 49.23 kg, esta última prueba se realizó del 9 al 11 de noviembre del 2018. Como se observa en las gráficas 4.3 y 4.4, la variación de la humedad relativa del aire, tanto al interior de la cámara de secado como en el colector solar, muestran un comportamiento similar para ambos lotes de café pergamino.



CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Gráfica 4. 3 Variación de la humedad relativa del aire en el colector solar y cámara de secado empleando el lote 1.

Fuente: propia.



Gráfica 4. 4 Variación de la humedad relativa del aire en el colector solar y cámara de secado empleando el lote 2.

Fuente: propia.

En dichas gráficas, es notoria la superioridad de la humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado comparada con la del colector solar, esto se debe a que en la cámara de secado se encuentra el producto a deshidratar y durante el proceso de secado la superficie del producto se satura con vapor, este es transmitido de forma continua al ambiente, lo cual da lugar a que exista una saturación de humedad mayor a la registrada en el colector solar.

Además, cabe destacar, que la humedad relativa del aire ambiente promedió 63 %, sin embargo, al pasar al interior del colector solar disminuye considerablemente hasta alcanzar un valor promedio de 6.35 %, lo que indica un correcto diseño.

4.6 Análisis de temperaturas del aire al interior del sistema de secado

El principal objetivo del colector solar, es captar la radiación solar de un área en específica y con esto elevar la temperatura del fluido al interior, justo como se aprecia en la figura 4.8.

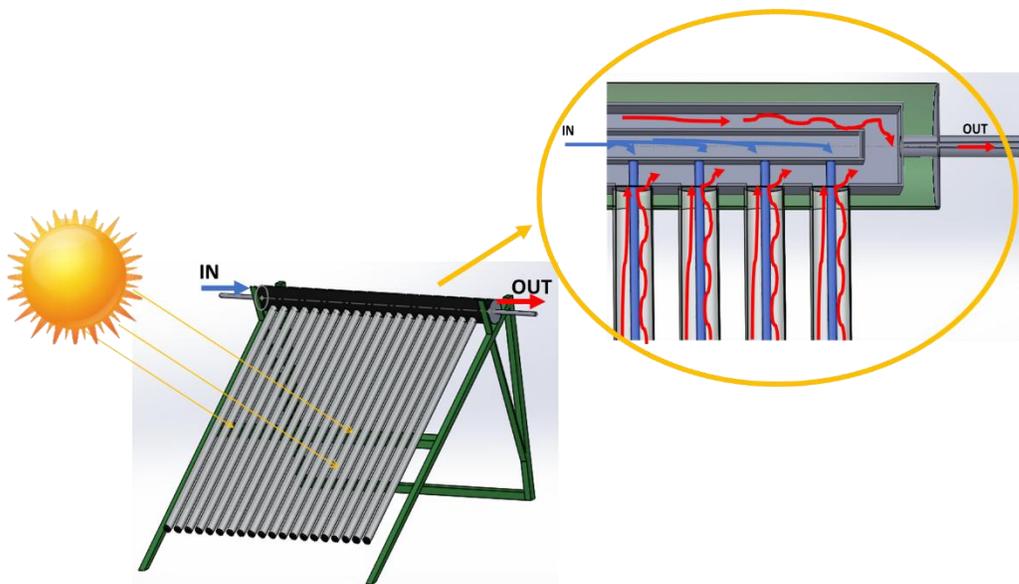
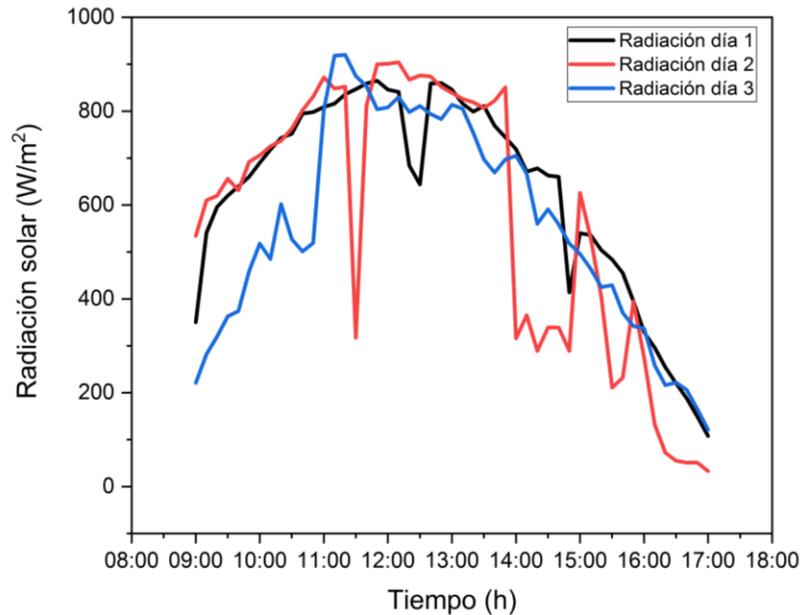


Figura 4. 8 Movimiento del aire en el interior del colector solar durante su calentamiento, con vista transversal.

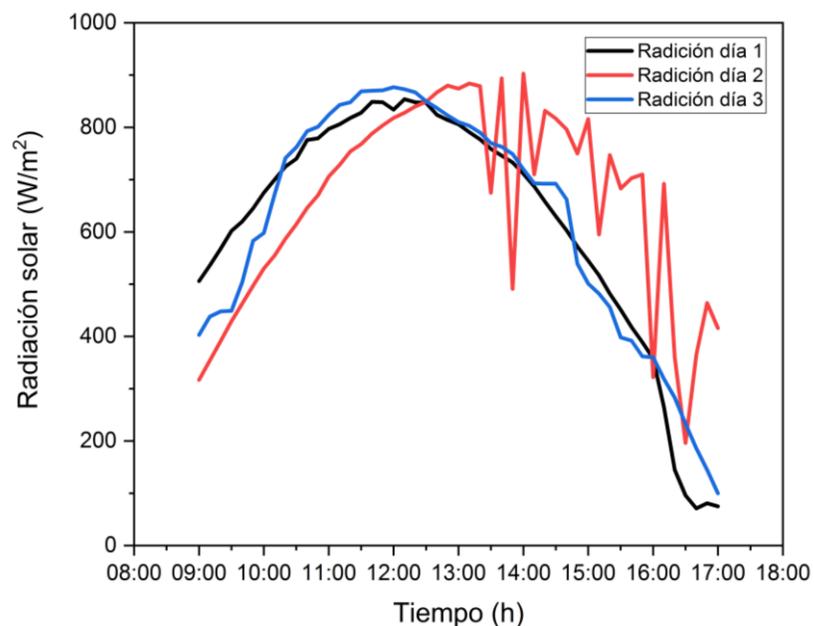
Fuente: propia.

Por lo cual, es necesario conocer los valores de radiación solar que inciden sobre el colector y así dar a conocer como la fluctuación en estos niveles se ve reflejado en las variaciones de temperatura del aire en el colector solar, es por ello que en las gráficas 4.5 y 4.6, se presentan los valores registrados de la radiación solar incidente sobre el colector solar. En dichas gráficas se observa un promedio de 585.86 W/m^2 en la prueba uno y de 631.34 W/m^2 para la prueba dos.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES



Gráfica 4. 5 Radiación solar en el periodo del 05 al 07 de noviembre de 2018.
Fuente: propia.



Gráfica 4. 6 Radiación solar en el periodo del 09 al 11 de noviembre de 2018.
Fuente: propia.

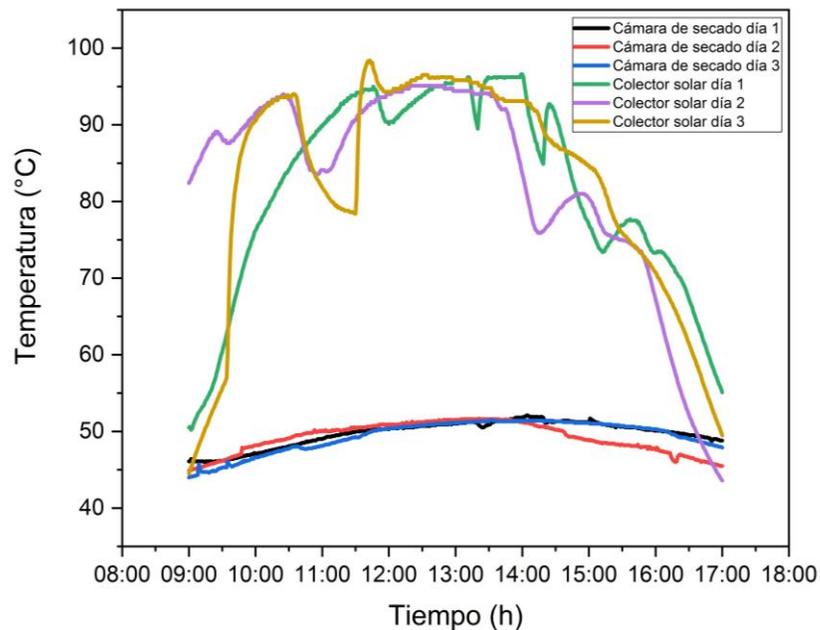
Con ayuda de los sensores DHT 22 descritos en el capítulo III, fue posible censar la temperatura del aire al interior del colector solar y de la cámara de

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

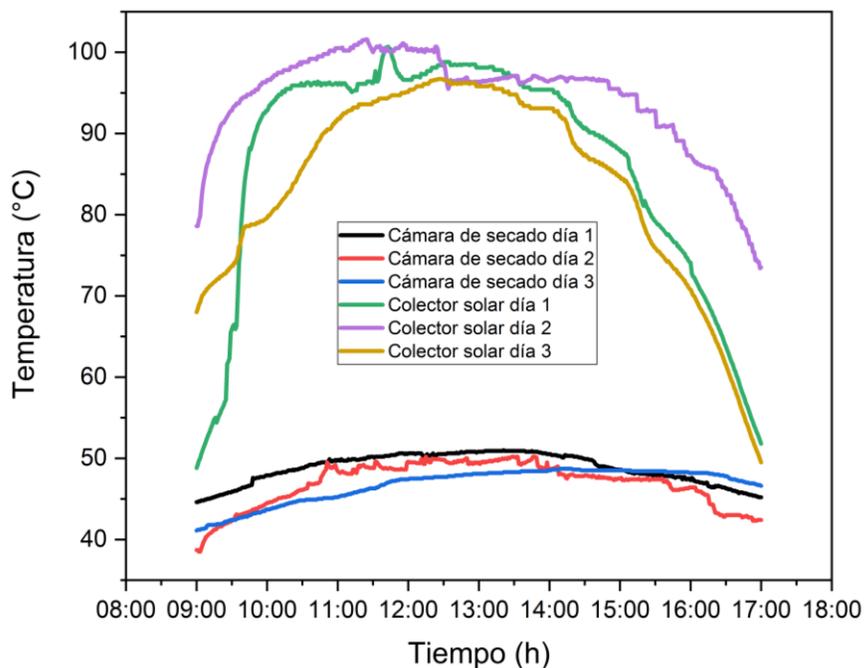
secado. Los periodos de monitoreo fueron realizados a la par de las operaciones de secado del producto, en donde se pudieron constatar las variaciones de temperatura en ambos puntos de monitoreo del sistema (colector solar y cámara de secado), los cuales pueden apreciarse a continuación en las gráficas 4.7 y 4.8.

Cabe resaltar que las variaciones en el incremento y declive en la temperatura registrada por los sensores, corresponden al mismo patrón presentado por la curva de radiación solar a lo largo del día de la prueba de secado. Dichas curvas de radiación solar pueden ser apreciadas en las gráficas 4.5 y 4.6, en donde se estima que entre las 11:00 am y las 14:00 horas es donde se presenta la mayor radiación solar incidente sobre el colector. El periodo de tiempo, donde se presenta la mayor radiación incidente sobre el colector, corresponde al mismo periodo de tiempo en donde la temperatura del aire al interior del mismo asciende a sus niveles más altos registrados, al mismo tiempo se aprecia que después de las 14:00 horas, cuando la radiación solar empieza a descender la temperatura lo hace de igual forma.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES



Gráfica 4. 7 Temperaturas en el sistema de secado (Colector solar vs Cámara de secado con muestra 1).
Fuente: propia.



Gráfica 4. 8 Temperaturas en el sistema de secado (Colector solar vs Cámara de secado con muestra 2).
Fuente: propia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Es necesario destacar la diferencia de temperaturas entre la cámara de secado y el colector solar, mientras que la temperatura promedio general al interior del colector solar fue de 85.25°C, la temperatura promedio del aire al interior de la cámara de secado durante las pruebas con producto fue de 48.45 °C; esta diferencia se debe a la acción del sistema de control. Este sistema de control fue programado para que cumpla con las condiciones de operación durante el proceso de secado de café, donde la temperatura de la cámara debe operar en un rango entre los 40 °C y 55 °C. Lo cual se explicó en el diagrama de flujo de la figura 4.2.3.

4.7 Análisis del funcionamiento del sistema de control

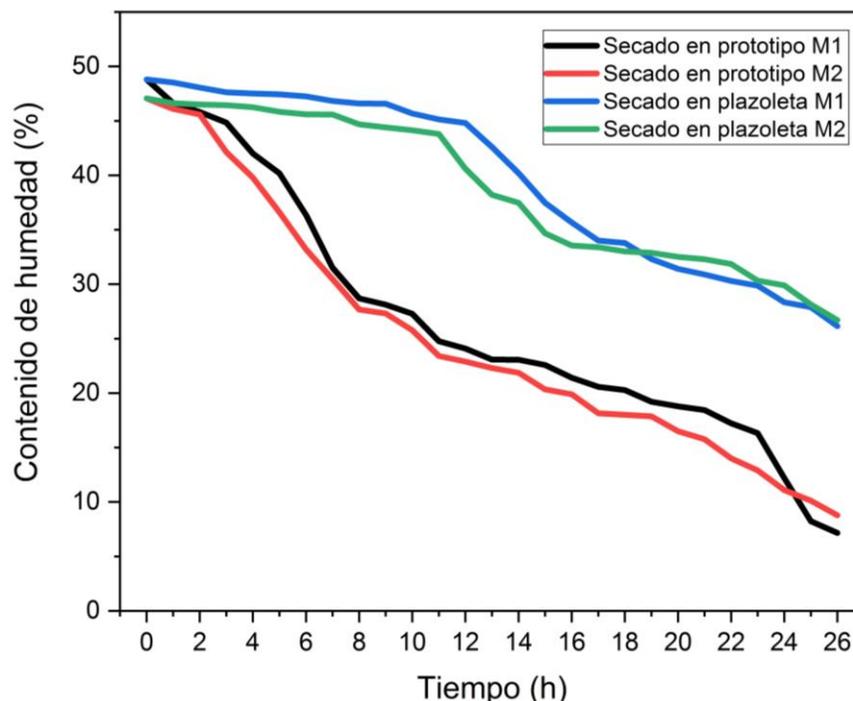
Se pudo constatar que el sistema de control incorporado en el prototipo de secador solar rotatorio se desempeñó según lo estipulado en los parámetros de control establecidos, los cuales se encuentran en los diagramas de flujo de la sección 4.2. Como se aprecia en las gráficas 4.7 y 4.8, la temperatura en la cámara de secado, promedió durante todo el proceso de secado de café un valor de 49.43 °C en las pruebas con el lote uno y 47.47 °C para la prueba con el lote dos.

El sistema de control de regulación de humedad también se comportó como estaba previsto, este mantuvo la humedad relativa del aire en cámara por debajo del 90 % como se puede apreciar en las gráficas 4.3 y 4.4. Es de notar que el sistema de control de humedad mantuvo a esta variable en un promedio de 32.91 % con el lote uno y 38.19 % para el lote dos.

4.8 Análisis de los tiempos de secado del grano de café mediante diferentes tecnologías

En la siguiente sección, se muestra a detalle los tiempos de secado para los granos de café de la variedad catimor, empleando dos métodos de secado, el secado tradicional en plazoleta bajo el sol y el secado en el prototipo de secador solar rotatorio.

Como puede ser apreciado en la gráfica 4.9, los tiempos de secado en los granos deshidratados con el prototipo de secador solar rotatorio son menores que los deshidratados con el método tradicional en plazoleta bajo el sol, la humedad obtenida al final de los tres días de secado con el método tradicional es de 26.14 % para el lote uno y 26.7 % para el lote dos, a diferencia de lo registrado para el caso donde se empleó el secador solar rotatorio, donde se obtuvieron valores de 7.16 % para el lote uno y 8.76 % para el lote dos.



Gráfica 4.9 Curva de secado comparativa entre el secador solar rotatorio y el secado tradicional. (El tiempo es en horas sol).

Fuente: Propia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como se muestra el tiempo de secado disminuyó en un 45.46 %, respecto al método que utilizan los cafetaleros de la región chiapaneca (secado al sol en plazoletas), lo cual equivale a la reducción aproximada de 3 días de secado.

Cabe resaltar que ambas pruebas experimentales de secado tuvieron una duración de tres días cada una, los cuales comprendieron ocho horas de medición por día iniciando a las 9:00 am y terminando a las 5:00 pm, las cuales corresponden a las horas solares del sitio. La primera prueba experimental se llevó a cabo con el lote uno y comprendió las fechas del 05 de noviembre al 07 de noviembre y la segunda prueba experimental empleando el lote dos en las fechas del 09 de noviembre al 11 de noviembre del 2018.

Conclusiones

1.- Se logró el diseño de un prototipo de secador solar rotatorio, que consta de tres subsistemas y se componen de la siguiente forma:

- a) Cámara de secado: consta de un cilindro de acero de 0.60 m de diámetro recubierto con aislante de espuma de poliuretano expandido y protegido de la intemperie con una chapa de acero galvanizada cedula 20. La longitud de la cámara de secado es de 0.88 m, con lo cual la cámara de secado otorga un volumen total de 0.248 m^3 . Dicha cámara de secado esta soportada sobre una estructura móvil de acero y en la parte trasera de la cámara se encuentra acoplada a un motorreductor de $\frac{1}{4}$ HP, que garantiza su rotación a 6 rpm.
- b) Colector solar: constituido por un total de 20 tubos al vacío de 1.8 m de longitud interconectados en paralelo, a cada tubo al vacío se le

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

insertaron tubos de $\frac{1}{2}$ " pulgada de acero para lograr el flujo forzado de aire al interior. El aire caliente es extraído del colector por conductor de 1".

- c) Sistema de control: cuenta con una tarjeta programable Arduino uno, 2 electroválvulas modelo YF-S201, 2 sensores de humedad y temperatura DHT22, uno colocado al interior de la cámara de secado y otro al interior del colector solar. Para el sistema de inyección de aire requerido de $0.299 \text{ m}^3/\text{s}$ se empleó una sopladora Makita UB1101.

2.- La construcción de dicho dispositivo, estuvo regida estrictamente por los parámetros de diseño y se llevó a cabo en el taller de usos múltiples del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables perteneciente a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. El tiempo de construcción efectivo del prototipo tuvo un aproximado de 120 horas en la cual participaron, alumnos de la institución y responsables del taller.

3.- En la prueba en vacío se logró obtener un promedio de $51.51 \text{ }^\circ\text{C}$ en la cámara de secado y de $80.82 \text{ }^\circ\text{C}$ en el colector solar. En relación al porcentaje de humedad relativa del aire, en la cámara de secador se logró mantener por debajo del 90% con un promedio de 22.39 y de 6.23 % en el colector solar.

4.- Las pruebas con producto registraron un promedio en temperatura del aire al interior de la cámara de secado de $49.43 \text{ }^\circ\text{C}$ con el lote uno y de $82.30 \text{ }^\circ\text{C}$ al interior del colector solar, mientras que con el lote dos se obtuvo un promedio de $47.47 \text{ }^\circ\text{C}$ en la cámara de secado y de $88.20 \text{ }^\circ\text{C}$ en el colector solar.

Los porcentajes de humedad respectivos a dichas evaluaciones corresponden a un promedio en la humedad relativa del aire de 32.91 % en la cámara de secado y a 6.23 % en el colector solar empleando un primer lote de producto y de 38.19 % en la cámara de secado y a 6.48 % en el colector solar empleando un segundo lote.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.- Se redujeron los tiempos de secado en un 45.46 %, comparado con el método que utilizan los cafetaleros del estado de Chiapas, el cual corresponde a la reducción en el tiempo de aproximadamente 3 días de secado, el cual mejora productividad del proceso.

Al final del tercer día de secado, la masa inicial del lote uno con 49.23 kg de café se redujo a 16.28 kg y la del lote dos de 49.23 kg a 16.84 kg. Esta disminución de la masa corresponde a la reducción de la humedad contenida en el producto desde un valor inicial del 48.81 % al 7.16 %, y de 47.06 % al 8.76 % respectivamente, que corresponde con un valor por debajo de su humedad de equilibrio (11-12%), para su almacenamiento y transporte.

A diferencia del secado en plazoleta, donde al final del tercer día de secado, la masa inicial del lote uno con 48.40 kg se redujo a 30.84 kg y la del lote dos de 49.40 kg a 32.01 kg. Lo cual corresponde a la reducción de la humedad contenida en el producto desde un valor inicial del 48.81 % al 26.14 %, y de 47.06 % al 26.7 % respectivamente.

6.- Las pruebas tanto en vacío como con carga demuestran la efectividad de los sistemas de control de parámetros. Manteniendo la temperatura y humedad relativa del aire dentro de la cámara, en el rango de los 40 °C a 55 °C y de los 90 % respectivamente.

7.- Con el desarrollo y la evaluación de este secador solar, es posible descargar un paquete de tecnologías para ser replicado en distintas regiones de la región en el que se puede generar un impacto positivo en la población.

Finalmente se logró obtener un diseño adecuado de un secador solar rotatorio para el deshidratado de granos de café, en el cual la cámara de secado, el

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

colector solar y el sistema de control cumplieron con todos los requerimientos establecidos en este proyecto.

Trabajos futuros

- Realizar estudios organolépticos del producto deshidratado en el secador solar rotatorio.
- Implementar un sistema de respaldo el cual asegure el trabajo continuo del secador solar rotatorio.
- 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.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Referencias

- Abdala Rodríguez, J. L., Fonseca Fonseca, S., Pantoja Enríquez, J., & Torres Gen, A. (2003). Secado De Café Pergamino En Secadores Solares Multipropósito Y De Tambor Rotatorio, *XXIII(3)*, 68–80.
- Adepoju, F., Fatai, A., Saula, I., & Bashir, S. (2013). Design parameters for a small- scale batch in-bin maize dryer. *Agricultural Sciences.*, 4(5):90-95. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45B017>
- Ajayi, O. O., & Sheehan, M. E. (2012). Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers. *Powder Technology*, 223, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.05.013>
- Alexopoulos, S. O., Dersch, J., Roeb, M., & Pitz-Paal, R. (2015). Simulation model for the transient process behaviour of solar aluminium recycling in a rotary kiln. *Applied Thermal Engineering*, 78, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.007>
- Alonso, E., Gallo, A., Roldán, M. I., Pérez-Rábago, C. A., & Fuentealba, E. (2017). Use of rotary kilns for solar thermal applications: Review of developed studies and analysis of their potential. *Solar Energy*, 144, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.004>
- Álvarez Morales, A. (2004). *Termodinámica del aire Acondicionado y Refrigeración*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA.
- Amedorme, S., Apodi, J., & Agbezudor, K. (2013). Design and construction of forced convection indirect solar dryer for drying moringa leaves. *Sch. J. Eng. Tech*, 1(3):91-97.
- Atmospheric Science Data Center. (2018). Surface meteorology and solar energy. Retrieved from <https://earthdata.nasa.gov/about/daacs/daac-asdc>
- Bayona Roa, C. A. (2011). *Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>
- Beuchat, L. R. (1983). Influence of Water Activity on Growth , Metabolic Activities and Survival of Yeasts and Molds, 46(2).
- Boris, A., & Luis, B. (2015). Secador solar de semillas y granos Secsol SG. Retrieved from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia71/html/articulo07.htm>
- C., T., M., T., & I., D. (1996). Eficiencia energética de un sistema de secado solar. *Energía Res.*, 20.

-
- CER-UNI. (1998). Manual de construcción y manejo del secador solar modelo invernadero, 13(511).
- Chamorro Sangoquiza, D. C. (2012). CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SECADORA DE PELLETS DE BALANCEADO.
- Fito, P., Chiralt, A., Betoret, N., Gras, M., Cháfer, M., Martínez-Monzó, J., ... Vidal, D. (2001). Viability of vegetables matrices as support of physiological active components. *Journal of Food Engineering*.
- Fonseca Fonseca, S., Abdala Rodríguez, J. L., Torres Ten, A., & Pantoja Enríquez, J. (2000). Análisis Térmico Del Secador Solar De Tambor Rotatorio Para Granos. *Tecnología Química*, XX(3), 70–75.
- Geankoplis, C. J. (1999). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*.
- Heldman, D. R., & Lund, D. B. (1992). *Handbook of Food Engineering*. (1st Edn). NEW YORK.: MARCEL DEKKER.
- Idiongo Basse, U., & Garba, I. (2013). Design, Construction and Experimental Evaluation of a Double Slope Solar Dryer in Kano, Nigeria. *The International Journal Of Engineering And Science*, 2(9): 26-35.
- INEGI. (2005). Marco Geoestadístico. Retrieved from www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem06/info/chs/.../c07101_01.xls
- INEGI. (2015). Anuario estadístico y geográfico de Chiapas. Retrieved from http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825077150.pdf
- Jangam, Law, & Mujumdar. (2010). Basic concepts and definitions. In: Drying of Food,s Vegetables and Fruits. *Energy Aspects in Drying. Drying Technology*, 1, 917–932.
- Jaramillo Calle, A. M., & Narváz Quiranza, E. Ri. (2012). Diseño y Construcción de un Secador de Grano por Fluidización e Implementación del Control de Flujo y Temperatura.
- Metodología de cálculo de espesores óptimos de aislamiento térmico. (2007). Retrieved from http://www.f2e.es/uploads/doc/20170615102007.aislamiento_industrial_part_2.pdf
- Montero, I. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos, 1–286. Retrieved from http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero_articulo?codigo=2158758&orden=0

-
- Nonhebel, G., & Moss, A. A. H. (2002). *El secado de sólidos en la industria química*. (REVERTÉ, Ed.).
- 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 Del Café. *Scientia Et Technica*, XIII(35), 207–212.
- Rao, N. K., Hanson, J., Dulloo, M. E., Ghosh, K., Nowell, D., & Larinde, M. (2007). *Manual para el Manejo de Semillas en Bancos de Germoplasma*. *Bioversity International*. [https://doi.org/ISBN 978-92-9043-757-4](https://doi.org/ISBN%20978-92-9043-757-4)
- Richter, C., Teske, S., & Short, R. (2009). Energía Solar Térmica de Concentración. *Iscore82*, 88. Retrieved from http://www.aperca.org/temp/pdf/concentracion_2009.pdf
- Romo, S., & Balaña, M. (2007). Secado solar en aplicaciones de la energía solar. Retrieved from <http://www.quimica.urv.es/~w3siiq/DALUMNES/99/siiq51/Seca.html>
- Sper Berna, J. R., & Torres Córdova, I. X. (2009). *Diseño de una Planta Deshidratadora de Banano usando Secador Rotatorio*.
- Tayeb, A. M. (1986). Modern solar grain dryer. *Solar and Wind Technology*, 3(3), 211–214. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(86\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0741-983X(86)90036-6)
- Van Puyvelde, D. R. (2009a). 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>
- Van Puyvelde, D. R. (2009b). 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>
- Vargas, L., & Arcelia, F. (2007). *DISEÑO DE SISTEMA HÍBRIDO CON AHORRO DE ENERGÍA: BOMBA DE CALOR-ENERGÍA SOLAR*. Retrieved from [http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/843/Tesis Final Ladrilleros.pdf?sequence=1](http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/843/Tesis%20Final%20Ladrilleros.pdf?sequence=1)
- Vijayavenkataraman, S., Iniyar, S., & Ranko, G. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652–2670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>
- Yomayusa, A., Alexis, G., Amaya, M., Camilo, D., Rodríguez, V., & Mauricio, A. (2015). Construcción de un prototipo secador rotatorio automatizado para café, 73.

Anexos

Anexo 1 Hoja técnica del motorreductor Dayton

- Item **AC Gearmotor**
- Gearmotor Type **AC Gearmotor**
- Gearmotor Voltage **115VAC**
- Gearmotor Phase **1**
- Max. Torque **600.0 in.-lb.**
- Gearmotor Shaft Type **Single**
- Gearmotor Shaft Orientation **Parallel**
- Gearmotor Rotation **CW/CCW**
- Nameplate RPM **6**
- Gearmotor Enclosure **Open Dripproof**
- Gearmotor Mounting Position **All Angle**
- Gearmotor Brake Type **None**
- Length Less Shaft **9-7/8"**
- Hz **60**
- Reversible Shaft Output **No**
- Overhung Load **300 lb.**
- Input HP **1/4**
- Gear Ratio **286:1**
- Full Load Amps **3.1**
- Insulation Class **B**
- Thermal Protection **None**
- Max. Ambient Temp. **40 Degrees C**
- Motor Type **Split-Phase**
- Shaft Dia. (Dimension U) **3/4"**
- Shaft Length (Dimension V) **1.5" _x000D_**
- Keyway Size# **605 Woodruff Key**
- Bearings **Porous Bronze Sleeve on Case, Ball on Motor**
- Lubrication **Grease Filled**
- Finish **Unpainted**
- Housing **Die Cast Zinc**
- Gear Case Material **Die Cast Zinc**
- Gears **Phenolic/Steel**
- Gear Material **Steel/Phenolic**
- Seals **Lip Type on Input and Output Shaft**
- Standards **RU/CSA**

Anexo 2 Tablas de las propiedades del aire a la presión de 1 atm

ÇENGEL, 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 , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /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 0-306067020-8.

Anexo 3 Fotografías del proceso de despulpado y selección del producto

