



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Desarrollo de un Tostador Solar de Cacao

TESIS

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Ing. Pablo Rene Torres Hernández

Director:

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Cunduacán, Tabasco, México.

Julio de 2018



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO DIR/DAIA/1388/2018
FECHA: 4 de Julio 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva

C. ING. PABLO RENE TORRES HERNÁNDEZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"DESARROLLO DE UN TOSTADOR SOLAR DE CACAO"

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Edgar Vicente Melo Macías ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR



C.c.p. Archivo

Dr.GPH/Dra.MAAL /apl.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 26 de Junio de 2018

MEM/MCI/009/2018

PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"DESARROLLO DE UN TOSTADOR SOLAR DE CACAO"

Desarrollado por el C. ING. PABLO RENE TORRES HERNÁNDEZ de la Maestría en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL

DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO
PRESIDENTE

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
SECRETARIO

DR. EDGAR VICENTE MELO MACÍAS
VOCAL 1

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN
RIVERA TREJO
VOCAL 2

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
VOCAL 3

c.c.p. Archivo

CARTA DE AUTORIZACIÓN

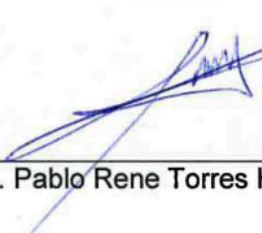
El que suscribe, autoriza por este medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis denominada "Desarrollo de un tostador solar de cacao", de la cuál soy autor y titular de los derechos de Autor.

¹ La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y cualquier otra red académica con las que la universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis antes mencionada y para los fines estipulados de este documento.

Se firma le presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los 10 días del mes de julio de 2018.

Autorizo



Ing. Pablo Rene Torres Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de formación profesional, por las facilidades y apoyos brindados para el desarrollo de este trabajo de Tesis.

A mi esposa y mi hijo, por sus sacrificios, el tiempo, cariño, la paciencia y la motivación que me dieron para realizar este trabajo de Tesis. A mis padres y hermanos, que me brindaron todo lo que estaba en sus manos para desarrollarme profesionalmente.

Al Dr. Edgar Vicente Macías Melo y la Dr. Karla Aguilar Castro, por proporcionarme todas las herramientas y conocimientos desde el inicio de la tesis hasta su final. Por su ejemplo de dedicación y excelencia en su trabajo que me motivaron a esforzarme para la culminación de este proyecto de tesis.

Al Dr. Pedro García Alamilla e Ing. Jhonatan Hernández Pérez, por el tiempo, conocimiento e instalaciones para poder desarrollar este trabajo de tesis.

Al Dr. María José Jiménez Taboada, por la atención, el tiempo y el conocimiento que me dio durante mi estancia en la Plataforma Solar de Almería.

Al Dr. Iván Alejandro Hernández Pérez, por sus consejos, conocimiento y motivación para crecer profesionalmente.

A Oscar May García, Adrián Vázquez Torres, Miguel Ángel Córdova Peregrino y todas las personas que apoyaron y aportaron ideas a este proyecto.

¡Muchas gracias!

Dedicatorias

"La ciencia sin religión está coja y la religión sin ciencia está ciega".

Albert Einstein

A Jesucristo

A Jesucristo que es la razón de mi vida y la motivación principal para seguir creciendo. Tú eres el que me has dado todo para poder triunfar.

A mi Esposa.

A mi amada esposa Karla que me brindo todo su cariño, tiempo, dedicación y por su ánimo para lograr mis objetivos.

A mi Madre

A mi madre que me ha dado todo lo que está en sus manos y más allá de sus fuerzas, gracias por el deseo enorme que tienes de verme triunfar.

A mi Padre

A mi padre por ser ejemplo de superación, honestidad y trabajo. Por todo el sacrificio y apoyo que me ha brindado.

A mis Hermanos

A mis Hermanos que me han dado todo su apoyo, cariño y su amor.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo y evaluación de un tostador solar de cacao utilizando un Concentrador Cilindro Parabólico (CCP). Para ello, se diseñó, construyó e instrumentó un prototipo experimental de un CCP. El diseño se dividió en tres secciones principales: área de captación solar, tubo absorbedor, y sistema de seguimiento solar. El tubo absorbedor se diseñó considerando dos configuraciones simuladas mediante Dinámica de Fluido Computacional, con el fin de encontrar la configuración con una distribución homogénea de la temperatura del aire interior. El CCP se construyó e instrumentó con la capacidad de: tostar 0.5 kg de cacao; monitorear la temperatura del grano, la temperatura ambiente y la irradiancia solar; así como, con la capacidad de seguir la trayectoria del sol. Para analizar el proceso de tostado se realizaron dos pruebas de funcionalidad sin cacao y nueve pruebas experimentales con cacao. El cacao tostado producto de las nueve pruebas, se sometió a cuatro pruebas fisicoquímicas: contenido de humedad, pH, acidez total y fenoles totales. En las pruebas de funcionalidad se encontró que el CCP alcanzó temperaturas superiores a 90°C aún bajo condiciones de cielo nublado parcialmente con una irradiancia de 304 Wm⁻². Las pruebas experimentales con cacao, se realizaron con diferentes tiempos de tostado (40, 55 y 70 min) y en diferentes horarios (10:00, 12:00 y 14:00 h.); y se encontró que para una irradiancia solar de 685.7 a 969 Wm⁻² y una temperatura ambiente de 33 a 38.4°C se alcanzaron las temperaturas de tostado de 96.6 a 127.5°C. Respecto a las pruebas fisicoquímicas para determinar la calidad del grano tostado, se encontró que el mínimo valor para el contenido de humedad fue de 2.13%, lo cual se encuentra cerca del valor reportado como ideal, 1.5-2%. Mientras que, el pH, acidez total y fenoles totales presentaron valores promedio de 4.94, 3.3 ml de NaOH (0.1 N) g⁻¹ y 39.81 mg g⁻¹ respectivamente, estos valores se encuentran dentro de los considerados adecuados para favorecer el aroma, antioxidantes y astringencia del cacao. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que el CCP sería una opción factible para continuar su aplicación en el proceso de tostado de cacao.

ABSTRACT

This work presents the development and evaluation of a cocoa solar toaster using a Parabolic Trough Concentrator (CCP). For this, an experimental prototype of a CCP was designed, built and instrumented. The design was divided into three main sections: solar collecting area, absorber duct, and solar tracking system. The absorber duct was designed considering two simulated configurations using Computational Fluid Dynamics to find the design with a homogeneous distribution of the interior air temperature. The CCP was built and instrument with the ability to: roast 0.5 kg of cocoa; monitor the temperature of the bean, the ambient temperature, and the solar irradiance; as well as, with the ability to follow the path of the sun considering the declination of the earth. Two tests of functionality without cocoa and nine experimental tests with cocoa were carried out to analyze the roasting process. The roasted cocoa product of the nine tests were subjected to four physicochemical tests: moisture content, pH, total acidity and total phenols. In the functionality tests, it was found that the CCP could reach temperatures above 90°C even under partly cloudy conditions. The experimental tests with cocoa were carried out with different roasting times (40, 55 and 70 min) and at different times (10:00, 12:00 and 14:00 h); and it was found that for a solar irradiance of 685.7 to 969 W/m² and an ambient temperature of 33 to 38.4°C the toasting temperatures were reached from 96.6 to 127.5°C, values that are within the reported in the literature. Regarding physicochemical tests to determine the quality of roasted cocoa bean, it was found that the minimum value for moisture content was 2.13%, which is close to the value reported as ideal, 1.5-2%. While, the pH, total acidity, and total phenols showed average values of 4.94, 3.3 ml of NaOH (0.1 N) g⁻¹ and 39.81 mg g⁻¹ respectively, these values are among those considered appropriate to promote the aroma and antioxidant properties of cocoa. The results obtained in this work indicate that the CCP would be a feasible option to continue its application in the cocoa roasting process.

Índice

	Pág.
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tablas.....	VIII
Nomenclatura.....	IX
 CAPÍTULO I. Introducción	
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Revisión bibliográfica.....	5
1.2.1 Características del tostado de cacao.....	5
1.2.2 Desarrollo de prototipos de concentradores solares para el proceso de tostado.....	7
1.2.3 Determinación de la eficiencia de un concentrador cilindro parabólico (CCP).....	9
1.3 Objetivo general.....	12
1.3.1 Objetivos particulares.....	12
1.4 Alcances del proyecto.....	12
1.5 Estructura de la tesis.....	13
 CAPÍTULO II. Fundamento teórico	
2.1 Energía solar.....	15
2.2 Concentradores solares.....	17
2.2.1 Tipos de concentradores solares.....	18
2.2.2 Seguimiento solar.....	19

2.2.3 Concentradores cilindro parabólico.....	20
2.3 Eficiencia de concentradores solares.....	22
2.4 El cacao	23
2.5 Pruebas fisicoquímicas.....	24
2.5.1 Humedad.....	24
2.5.2 pH.....	25
2.5.3 Acidez total.....	26
2.5.4 Grasa.....	27
2.5.5 Fenoles totales.....	28
 CAPÍTULO III. Metodología	
3.1 Diseño y construcción del CCP.....	31
3.1.1 Reflector Cilíndrico Parabólico (RCP).....	31
3.1.2 El tubo absorbedor o receptor.....	33
3.1.3 El sistema de seguimiento solar.....	38
3.2 Instrumentación del CCP	40
3.2.1 Sistema de automatización para el seguimiento solar.....	40
3.2.2 Medición de temperatura en el CCP.....	41
3.2.3 Medición de variables meteorológicas.....	44
3.3 Procedimiento experimental.....	45
3.3.1 Tostado de cacao.....	47
3.3.2 Pruebas fisicoquímicas.....	48

CAPÍTULO IV. Resultados y Discusión

4.1 Muestra.....	55
4.2 Pruebas de funcionalidad: sin cacao.....	56
4.3 Pruebas experimentales de tostado con cacao.....	62
4.4 Eficiencia del CCP para el proceso de tostado.....	71
4.5 Pruebas fisicoquímicas de cacao tostado.....	72
4.5.1 Contenido de humedad	72
4.5.2 pH y acidez total.....	73
4.5.3 Fenoles totales.....	74

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
--	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
--	-----------

ANEXO A. Artículo de divulgación.....	85
--	-----------

ANEXO B. Actividades Académicas.....	95
---	-----------

Lista de Figuras

	Descripción	Pág.
2.1	Arreglos experimentales de concentradores solares, a) Torres Centrales, b) Concentrador parabólico, c) Concentrador cilindro parabólico, d) Concentrador Fresnel reflectivo.	20
2.2	Escala de pH.	25
2.3	Equipo de extracción Soxhlet.	28
2.4	Ejemplo de curva de calibración de contenido de fenoles.	29
3.1	Estructura del área de captación.	32
3.2	Diseño del receptor del CCP.	34
3.3	Mallado del tubo en Gambit.	35
3.4	Gráfica de residuales.	36
3.5	Simulación del tubo, a) y b) exterior e interior del tubo a 120°C y 25 rpm; c) y d) exterior e interior del tubo a 140°C y 25 rpm; e) y f) exterior e interior del tubo a 160°C y 25 rpm	37
3.6	Estructura del seguimiento Cénit y Azimutal.	39
3.7	a) Motor NEMA 23 y b) sistema de control de motores.	41
3.8	Instalación de termopares.	42
3.9	Equipo de calibración.	43
3.10	Instrumentación meteorológica, a) Sensor de temperatura ambiente y b) Piranómetro para medir la radiación global.	45
3.11	Prototipo experimental del CCP con sistema de control.	46
3.12	Diagrama de flujo del procedimiento de tostado solar.	48
3.13	Diagrama de flujo de la prueba de humedad.	49
3.14	a) Selección y pesado de los granos; b) secado de la muestra y c) pesado de los granos secas.	49
3.15	Diagrama de flujo de la prueba de pH.	50
3.16	a) Trituración y tamizado de la muestra; b) mezclado del polvo y c) medición de pH.	50
3.17	Diagrama de flujo de la prueba de la acidez total.	51

3.18	a) Pesado de la muestra; b) filtrado y c) titulación de la muestra.	51
3.19	Diagrama de flujo de la prueba de grasa.	52
3.20	Diagrama de flujo de la prueba de fenoles totales.	53
3.21	a) Desgrasado de la muestra; b) adición de agua o etanol a la muestra y c) centrifugado y medición de absorbancia.	53
4.1	Grano de cacao instrumentado.	55
4.2	Tubo absorbedor después de 5 minutos desde el inicio.	58
4.3	Tubo absorbedor después de 10 minutos.	58
4.4	Tubo absorbedor después de 15 minutos.	59
4.5	Tubo absorbedor después de 20 minutos.	59
4.6	Prueba preliminar 2 sin cacao, a) Variables meteorológicas y b) Comportamiento de la temperatura del aire interior.	61
4.7	Prueba 1 de 55 min de tostado a las 12:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.	63
4.8	Prueba 2 de 70 min de tostado a las 10:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.	65
4.9	Prueba 4 de tostado de 70 min de tostado a las 14:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.	66
4.10	Prueba 5 de 40 min de tostado a las 10:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.	68
4.11	Prueba 8 de 40 min de tostado a las 14:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.	69

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
2.1	Valores de pH para algunos alimentos.	26
3.1	Resumen de las simulaciones realizadas.	38
3.2	Temperatura promedio y desviación estándar de los termopares.	44
3.3	Ecuación de ajuste y EEE de los termopares.	44
3.4	Resumen de las pruebas realizadas considerando un Diseño Compuesto Central (DCC).	47
4.1	Resumen de parámetros iniciales y finales de la prueba preliminar 1.	57
4.2	Comportamiento de la temperatura de la prueba preliminar 1.	57
4.3	Resumen de las temperaturas promedio y condiciones ambientales durante las pruebas.	71
4.4	Datos utilizados para el cálculo de la eficiencia	72
4.6	Resumen de los resultados promedio de las pruebas fisicoquímicas realizadas.	76

NOMENCLATURA

Variables	Descripción	Unidades
A	Área	m ²
Ac	Acidez	ml g ⁻¹
C _p	Calor específico	J g ⁻¹ °C ⁻¹
f	Foco de la parábola	m
h	Entalpía	J kg ⁻¹
I	Irradiancia	W m ⁻²
k	Conductividad Térmica	W m ⁻² °C ⁻¹
L	Distancia	m
m	Masa	g
Q	Calor	J
T	Temperatura	°C
t	Tiempo	s
TPC	Contenido total de fenoles	mg g ⁻¹
V	Volumen	ml
W	Ancho	m
Letras griegas		
η	Eficiencia	%
α	Absortancia	%
ρ	Reflectancia	%
τ	Trasmitancia	%
γ	Factor de intersección	Adimensional
θ	Ángulo de incidencia	°
Subíndices		
A	Aire	
a	Apertura	
amb	Ambiente	
c	Cacao	

NOMENCLATURA

C1	Cámara 1
C2	Cámara 2
C3	Cámara 3
ev	Agua evaporada
f	Final
G _{sc}	Constante solar
i	Inicial
L	Libre
mg	Matraz con grasa
msg	Matraz sin grasa
max	Maximo
o	Óptica
p	Parábola
PC1	Superficie del ducto de la cámara 1
PC2	Superficie del ducto de la cámara 2
PC3	Superficie del ducto de la cámara 3
rb	Reactivo base
t	Total
u	Útil

Capítulo 1

Introducción

En este Capítulo se presentan las generalidades del uso de concentradores solares cilindro parabólico y su implementación en el proceso de tostado de cacao, de acuerdo a las especificaciones del tostado de cacao; así como, una revisión sobre el uso de otros tipos de concentradores para el proceso de tostado. Lo anterior, con el propósito de proporcionar los antecedentes que fundamentan la aportación de este proyecto de tesis.

1.1 Generalidades

El cambio climático que se ha tenido en los últimos años, producido mayormente por los combustibles fósiles, afecta seriamente a nuestro ecosistema. Además del cambio climático, la disminución de las reservas probadas de hidrocarburos, su extracción más compleja y la demanda del mismo, ha provocado inestabilidad en el mercado energético. Lo anterior ha propiciado que algunos países estén buscando alternativas energéticas que sean más eficientes, competitivas y sustentables en el largo plazo (Romero, *et al.*, 2012).

Las energías renovables presentan una alternativa a considerar, ya que demuestra un bajo impacto ambiental y tienen un gran potencial económico, debido a los recursos inagotables a escala humana. Las energías renovables se clasifican de la siguiente manera: hidráulica, solar, eólica y mareomotriz. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables aquellas provenientes de la biomasa y de fuentes geotérmicas (Jara, 2008).

La energía solar se puede clasificar en energía solar fotovoltaica y energía solar térmica. ¹⁴ La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos. La energía solar térmica consiste en la conversión de la radiación solar a energía térmica, que puede ser aprovechada de manera pasiva al captarla, almacenarla y distribuirla de forma natural sin ningún dispositivo mecánico y también puede ser aprovechada de manera activa utilizando dispositivos mecánicos (Jara, 2008).

La utilización de la energía solar térmica la podemos dividir de tres maneras de acuerdo a Romero, *et al.*, (2011): La primera consiste en utilizarla para procesos de baja temperatura, menos de 100°C; la segunda para procesos de mediana temperatura, entre 100°C y 350°C; y la última en procesos de alta temperatura, entre 350°C a 2000°C. La utilización de la energía solar térmica para proceso de

mediana temperatura puede proveer el calor requerido en la industria química, papelera, textil, de alimentos, etc. y en los procesos de secado, esterilización, etc. Sustituyendo o disminuyendo el uso de combustibles fósiles y a su vez reduciendo el impacto ambiental (Venegas, *et al.*, 2012).

Uno de los dispositivos que aprovecha la energía solar para los procesos de mediana temperatura son los Concentradores Cilindro Parabólicos (CCP), que se han estudiado ampliamente tanto analítica y experimentalmente y se han propuesto y usado para aplicaciones relacionadas de concentraciones intermedias y temperaturas que alcanzan hasta 400°C (Jebasingh & Herbert., 2016). Estos dispositivos obtienen radiación solar concentrada sobre un área reducida, aumentando la energía térmica (Duffie & Beckman, 2013).

Estos dispositivos son una opción para disminuir el impacto ambiental en los procesos de mediana temperatura, además de su operación simple y bajos costos de operación comparado con los combustibles fósiles. Una de las industrias favorables para utilizar esta tecnología es la de los alimentos, debido a que en el procesamiento de dichos alimentos específicamente en los procesos de tratamiento y almacenamiento requieren un alto consumo de energía, donde podrán utilizarse en los procesos que estén en el intervalo de temperatura entre 100 a 500°C (Venegas, *et al.*, 2012). Algunas de las aplicaciones más recientes de los CCP dentro de la industria alimentaria son: procesar camarones y alimento de pollos (Tagle *et al.*, 2016), deshidratación de guayaba (Ullah, *et al.*, 2016), y secado de tabaco (Liu, *et al.*, 2014).

¹ Uno de los procesos productivos dentro de la industria alimentaria donde se puede aplicar el uso de CCP es en el tostado de los granos de cacao para la elaboración de chocolate. El cacao es uno de los productos más apreciados en el mercado internacional debido a que sus derivados tienen gran demanda y, por lo tanto, alto valor comercial, México dejó de ocupar los primeros lugares de producción de cacao en la última década, produciendo solo el 41.22% de la demanda nacional,

los estados con mayor producción son el estado de Tabasco y Chiapas (SAGARPA, 2017). El proceso de transformación de los granos de cacao, se lleva a cabo de manera tradicional mediante la quema de combustibles fósiles produciendo la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. Las condiciones de operación para el tostado de cacao generalmente tienen una duración entre 5 y 120 min (Aprotosoie, *et al.*, 2016); y la temperatura de tostado varía entre 90 y 170°C dependiendo del tipo de tostado adoptado, es decir, el tostado seco o húmedo (Afoakwa, 2016).

Actualmente se ha reportado el tostado de cacao usando concentradores solares por Escalante, (2015), Veynandt, *et al.*, (2016) y por la compañía Cocina Solar Solar, (2016). Estos trabajos han utilizado concentradores de heliostatos y concentradores parabólicos tipo Scheffler. Sin embargo, los CCP se encuentran dentro del intervalo de la temperatura del tostado de cacao que es de 90 a 170°C, además de que la característica de los CCP es concentrar la energía solar sobre una línea del receptor proporcionando un aumento en el flujo de radiación y una mayor homogeneidad (Mao *et al.*, 2015). En contraste con el concentrador tipo Scheffler que tiene un punto focal pero disminuye el flujo de la radiación, el CCP presenta mayor homogeneidad en la cantidad de radiación recibida debido a que se concentra de forma longitudinal en el foco de la parábola. Generalmente, el uso de concentradores solares es costoso, pero la estructura de los CCP para la temperatura que se requiere para el tostado se pueden construir a bajo costo con estructuras ligeras y simples, tal como lo reportan Venegas *et al.*, (2012), Lamba (2012) y Patoda & Parashar (2013), para aplicaciones de uso doméstico, pequeña escala industrial, entre otras aplicaciones. Lo anterior nos indica que los CCP pueden ser una tecnología sencilla y factible para la implementación en el tostado de cacao.

El implementar el uso del CCP para el tostado de granos como el cacao, tendría beneficios a nuestro ecosistema al disminuir el uso de la energía no renovable que se requiere para este proceso. Además, de facilitar su procesamiento en regiones donde no cuentan con suministro de energías convencionales.

1.2 Revisión bibliográfica

Para el análisis de la información de este proyecto, los documentos revisados se clasificaron en tres subtemas principales: 1) características del tostado de cacao, 2) desarrollo de prototipos de concentradores solares para el proceso de tostado y 3) evaluación de la eficiencia de un concentrador cilindro parabólico (CCP). A continuación se describen los trabajos más importantes analizados de estos subtemas.

1.2.1. Características del tostado de cacao

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un árbol tropical de origen prehispánico, sus granos son apreciados en el mercado internacional por los productos que se generan a partir de ellas. Los granos se pueden clasificar en: criollo que es utilizado para la elaboración de chocolates finos; forastero que tiene la ventaja de mayor facilidad en el cultivo; y trinitario que es una mezcla entre el criollo y el forastero (Avendaño, *et al.*, 2011). Las etapas durante el proceso de obtención de chocolate son: la recolección, fermentación, lavado, secado, tostado, descascarillado, molienda, obtención de pasta de cacao y posteriormente, la mezcla de ingredientes para la obtención de chocolate. El tostado es una de las etapas más importantes en el procesamiento del cacao, ya que en esta etapa se producen compuestos derivados de las reacciones entre azúcares reductoras y aminoácidos, conocidos comúnmente como las reacciones de Maillard, lo cual causa un cambio sustancial en la composición química, color, aroma, y la textura de los granos de cacao (Jurgen Voigt *et al.*, 2016, Sandra *et al.*, 2015, Dorota Zyzélewicz *et al.*, 2013).

García *et al.*, (2017) evaluaron el efecto de la temperatura y el tiempo de tostado del cacao en un tostador de tanque horizontal giratorio calentando por gas. Las temperaturas de pruebas fueron de 110 a 170°C y los tiempos de tostado de 5 a 65 min. Los parámetros fisicoquímicos para medir la calidad del tostado fueron la humedad, actividad en agua, pH, acidez total, contenido de fenoles totales, color y capacidad DPPH radical (antioxidantes). Las condiciones de temperatura y tiempo aplicadas durante el proceso de tostado de los granos de cacao en un sistema de tambor giratorio presentaron una respuesta no lineal significativa para la humedad, actividad en agua, pH, acidez total y color, esto se debe a las condiciones variables de la cosecha del cacao. La temperatura y el tiempo son factores que influye para el caso de contenido de fenoles totales y antioxidantes.

Farah *et al.*, (2012) presentaron un estudio para la optimización del proceso de tostado de los granos de cacao utilizando la metodología de superficie de respuesta, basado en las concentraciones de pirazina y acrilamida, donde la pirazina es un sub-producto de las reacciones químicas que se dan en el proceso de tostado y que este subproducto es de gran importancia ya que contribuye al sabor único de cacao, en contraste con la acrilamida que también es un subproducto del tostado, este compuesto es cancerígeno. Los granos tostados eran de Indonesia y fueron descascarilladas y cortadas en partículas de 10 a 5 mm. Las temperaturas de tostado fueron de 110 a 160°C en un intervalo de tiempo de 15 a 40 min. Los resultados mostraron que en el rango de temperaturas del tostado, la concentración de acrilamida no es significativa, además en que la temperatura óptima donde se encontraron concentraciones altas de pirazina fue a los 116°C con un tiempo de 23 min.

Zyzélewicz, *et al.*, (2014 A) presentaron un estudio para analizar la influencia de los parámetros variables o constantes durante el proceso de tostado del cacao en las concentraciones de tocoferol en la manteca de cacao extraída de granos de cacao tipo forastero originarias de Togo. Tocoferol, es el nombre de varios compuestos orgánicos conformados por varios fenoles metilados, los cuales

actúan como vitamina E. Para este análisis, los granos de cacao se tuestan a condiciones de temperatura variables entre 135 y 150°C (y de 135-150°C) con velocidad del aire de 1.0 a 0.5 ms⁻¹ (y de 0.5 a 1 ms⁻¹) y con humedad relativa de 5 a 3%. El proceso de tostado se da por terminado cuando el agua contenida en las muestras ha decrecido a un 2%. Después del proceso de tostado los granos inmediatos fueron enfriados a 20°C utilizando un enfriador de aire, almacenando los granos en contenedores aproximadamente una hora para alcanzar la misma temperatura y niveles de humedad en todas los granos. En el experimento los granos de cacao fueron tostados de dos maneras, granos enteros y triturados, y se variaron las condiciones de tostado como temperatura, humedad relativa y velocidad del aire descritas en (Zyzélewicz, *et al.*, 2014 B). Dentro de los resultados más relevantes se encontró que la calidad del tostado fue mejor en granos triturados que enteras, con pocas pérdidas de tocoferol, además de que las mejores condiciones de tostado se obtuvieron a 150°C y 35 min.

Después de revisar la literatura sobre las características de tostado, se puede decir que para determinar la calidad del tostado de los granos de cacao, es necesario considerar principalmente las siguientes condiciones:

- Los parámetros del tostado dependen del tipo de grano y los tratamientos que llevo previo al tostado, de tal manera que la temperatura y el tiempo idóneo para un buen tostado dependerá de esto.
- El intervalo de temperatura y tiempo reportado dentro de la literatura varía de 90 a 170°C y de 5 a 120 min.
- Los granos triturados o cortados en partículas más pequeñas mejoran la calidad del tostado.

1.2.2. Desarrollo de prototipos de concentradores solares para el proceso de tostado.

Los trabajos que se han realizado actualmente en el uso de concentradores solares para el proceso de tostado de granos son: tostado de café (Hadzicha, *et al.*, 2014) y tostado de cacao (Escalante, 2015; Veynandt, *et al.*, 2016). Hadzicha,

et al., (2014) utilizaron un concentrador solar parabólico tipo Scheffler para el tostado de café. El tostador solar tiene un área de concentración de 2.7 m^2 y con un tambor (recipiente que contiene los granos de café) donde se concentra la energía solar para realizar el tostado, con 25 cm de diámetro, 23 cm de longitud, y con una abertura de 20 cm. Con esta tecnología se llegó a tostar 1 kg de café en 24 min., con una irradiancia promedio de 740 W m^{-2} y 1.5 kg de café en 36 minutos con irradiancia promedio de 900 W m^{-2} . Para aumentar la eficiencia de tostado se utilizó acero inoxidable y un aislamiento térmico en el tambor. Este último tenía un movimiento giratorio para que el tostado de café fuera más homogéneo.

Escalante (2015) utilizó un concentrador tipo Scheffler con un área de concentración de 8 m^2 , que a su vez refleja la radiación solar en un segundo concentrador de la forma cilíndrica, esa energía es concentrada en una olla de 40 cm de diámetro y 30 cm de alto, donde se tuesta el cacao. La olla se precalentó a 200°C , posteriormente se agregaron los granos de cacao y se extrajeron cuando se alcanzó una temperatura de 140°C . Con este prototipo se llegó a tostar 3 kg en aproximadamente en 35 min., con una irradiancia promedio de 909 W m^{-2} . Para mejorar el rendimiento térmico se le colocó un aislamiento térmico de fibra de vidrio y se aplicó un recubrimiento negro lá parte inferior de la olla. Para asegurar la homogeneidad de los granos se colocó un mecanismo con unas paletas para remover el cacao, este mecanismo era operado por un motor de corriente directa.

Veynandt *et al.*, (2016) utilizaron dos concentradores tipo Scheffler para el tostado de cacao, con un área de concentración de 2.7 m^2 y 8 m^2 respectivamente. El contenedor de granos se precalentó a 120°C , posteriormente se agrega los granos de cacao, calentándolas a una temperatura de 120 a 160°C y por último, se extraen los granos cuando estas alcanzan la temperatura de 140°C . Se realizó el tostado de 6 kg de cacao en 30 minutos con el concentrador de 8 m^2 , y el tostado de 2 kg en 30 min, con el concentrador de 2.7 m^2 , con una humedad de 1.8% y 53.1% de grasa respectivamente. El mayor rendimiento térmico para el tostador

solar fue cuando: el contenedor tiene una inclinación de 20° como límite máximo, cuenta con aislamiento, a una velocidad de rotación de 20 rpm y cuando las paredes del contenedor son de acero con recubrimiento de esmalte negro. La cantidad máxima de cacao que fue posible tostar en el concentrador de 2.7 m^2 fue de 2 kg y de 6 kg para el de 8 m^2 .

1.2.3 Determinación de la eficiencia de un concentrador cilindro parabólico (CCP)

Dentro de las aplicaciones de los CCP de acuerdo a Jebasingh y Herbert (2016), se encuentran: a) Sistemas de calentamiento de aire para la industria textil, de alimentos, agricultura y calefacción de edificios; b) Procesos de desalinización; c) Sistemas de refrigeración; d) Para calor de procesos industriales como el secado, la esterilización, la cocción, la limpieza y la purificación, entre otros; y f) Plantas para la generación de energía eléctrica.

Tagle *et al.*, (2016) presentaron los resultados de dos sistemas instalados en México (concentradores cilindro parabólico) comparando los resultados con datos computacionales y experimentales, Caso 1 y Caso 2. Los sistemas de colectores utilizados tienen tres componentes principales: el colector, el seguidor solar y el dispositivo de medición de datos. El equipo cuenta con las siguientes dimensiones: apertura de la parábola de 1.1 m, longitud de canal de 3 m, área de concentración de 3.3 m^2 y 2.54 cm de diámetro del tubo receptor. Los materiales con que se manufacturaron fueron: aluminio anodizado para el espejo de la parábola, la estructura de acero galvanizado, el tubo receptor de AISI 304 y una cubierta de vidrio de borosilicato con un peso total de 55 kg. El sistema de seguimiento solar funciona con sensores que determinan la posición del sol y envían señales a una placa electrónica que controla los movimientos del colector. El dispositivo de medición y monitoreo de datos fue diseñado para reducir la demanda del sistema en horarios de alto costo y para medir los parámetros eléctricos. El Caso 1 utiliza 80 colectores en serie para procesar comida para pollo en Morelia Michoacán, la temperatura de entrada fue de 25°C y la temperatura de

salida fue de 85°C con una potencia total de 140 kW, y se obtuvo una eficiencia promedio de aproximadamente 58%. En el Caso 2 se utilizan 54 colectores en serie para agua caliente para procesar camarones en San Miguel, Sinaloa, donde la temperatura de entrada fue de 37.7°C y la temperatura de salida fue de 90°C con una potencia total de 103 kW, la eficiencia obtenida fue de aproximadamente 57%. Los resultados de modelación con los resultados experimentales muestran que el modelo predice la potencia térmica con un 10% de error en la precisión.

Ullah, *et al.*, (2016) presentaron un dispositivo de CCP para deshidratar guayaba, compuesto por el CCP y una cámara de secado. El diámetro de la parábola es de 1.94 m, una altura de 0.51 m y un diámetro de 5 cm para el tubo absorbedor. El tubo absorbedor recibió aire ambiente desde la válvula de entrada y se calentó con los rayos reflejados desde el colector y este aire calentado se suministró a la cámara de secado que está conectada a la válvula de salida del absorbedor. Las guayabas se cortaron en dos piezas y se sumergieron en la solución de Meta-Bisulfato de potasio al 1% y se secaron con la temperatura de 65°C a un nivel de humedad del 25%. El tiempo de secado fue de 19 horas, los resultados mostraron que la eficiencia de CCP para el mes de octubre fue 30% más alta en comparación con el mes de noviembre y diciembre, donde se presentaron eficiencias del 25% y 23%, respectivamente. Para estos valores de eficiencia se obtuvo un contenido de humedad de hasta el 11%, 13% y 15%, para octubre, noviembre y diciembre respectivamente.

Liu, *et al.*, (2014) utilizaron un CCP para el secado de tabaco, con un diámetro de la parábola de 3.2 m y una longitud de 10 m, con un área de concentración de 30 m². La apertura del absorbedor con una cavidad en V fue de 4 cm y 7 cm. Las condiciones para el secado de tabaco fueron, una velocidad de aire 15 m s⁻¹ y una temperatura del aire de 200°C. La eficiencia ¹⁸ del secador y el contenido final de humedad del tabaco cortado fueron de 66.32% y 14.15%, respectivamente.

Venegas, *et al.*, (2012) desarrollaron una tecnología solar para proporcionar vapor de baja entalpía y agua caliente en el rango de 70 a 110°C que se puede aplicar a la desinfección del suelo. El CCP con un ángulo de borde de 45°, una longitud de 4.88 m y un área de concentración de 5.8 m², construido con láminas y estructura de aluminio. El tubo absorbedor fue un tubo de cobre pintado con Zynolyte que tiene una absorptancia de $\alpha=95\%$. La temperatura máxima para el agua fue de 95°C. Se encontró que fue posible alcanzar eficiencias máximas cercanas al 60% con un caudal de 6 litros por minuto bajo una irradiancia solar directa de 865 W m⁻², con ángulo de incidencia de 0°.

Considerando la literatura revisada sobre los tipos de CCP y sus máximas eficiencias, se puede concluir de estas secciones que los CCP presentan ventajas de operación y alcanzan temperaturas en el intervalo del tostado de granos de cacao lo que les permite proveer la energía necesaria para este proceso, además de disminuir los costos y facilitar su construcción en comparación con otro tipo de concentradores. De acuerdo a lo descrito en la literatura para el tostado de cacao se debe considerar: utilizar granos de cacao secados al sol y fermentados; un intervalo de tiempo de 40 a 70 min para las pruebas de tostado; y realizar pruebas de humedad, pH, Acidez total y contenido total de fenoles para determinar la calidad de los granos tostados. Por otro lado, es importante destacar que los experimentos que se han realizado recientemente solo han sido con concentradores parabólicos tipo Scheffler, los cuales presentan como principal desventaja que no se aprovecha el 100% de radiación solar reflejada por la parábola ya que en el diseño del tubo absorbedor tiene una abertura de 20 cm como mínimo, en la cual podrían salirse los granos. Por lo anterior, se tiene que realizar una inclinación para evitar las salidas de los granos, al realizar esta inclinación se reduce el aprovechamiento de la radiación solar que entra en el tubo absorbedor. El CCP mejora esta condición, al encontrarse el tubo absorbedor por arriba del CCP, debido a que este se encuentra en el centro de la parábola permitiendo una recepción homogénea de la radiación solar (Duffie & Beckman, 2013). Además los trabajos sobre tostado solar no consideran las pruebas físico-

químicas para determinar la calidad del tostado en los granos de cacao, solo mencionan la calidad de tostado en función de la temperatura. Aunque los CCP no se han utilizados para aplicaciones de tostado de granos, son los concentradores reportados con más desarrollo tanto analíticamente como experimentalmente. Los CCP mencionados anteriormente realizan la transformación de la radiación solar recibida en energía térmica necesarias para cumplir con los diferentes procesos donde son aplicados, teniendo eficiencias máximas del 60% (Venegas, *et al.*, 2012; Liu, *et al.*, 2014). Considerando lo anterior, se puede decir que el CCP pueden ser una opción viable y factible para realizar el tostado de cacao.

1.3 Objetivo general

Desarrollar y evaluar un tostador solar de cacao utilizando un concentrador cilindro parabólico, donde se pueda monitorear la calidad del proceso de tostado de granos de cacao y determinar la eficiencia del sistema.

1.3.1 Objetivos particulares

- Diseñar el concentrador solar cilíndrico parabólico y el contenedor de granos de cacao.
- Construir el concentrador solar cilíndrico parabólico y el contenedor de granos de cacao.
- Realizar pruebas experimentales para determinar la eficiencia del proceso de tostado solar de cacao.
- Evaluar la calidad de los granos de cacao tostada y determinar las oportunidades de mejora del prototipo experimental.

1.4 Alcances del proyecto

- El CCP cuenta con un área de captación solar de 0.744 m², con un sistema de seguimiento solar del ángulo Cenit y Azimutal, y con la capacidad para tostar hasta 0.5 kg de cacao.

- El estudio experimental del tostado de cacao con el CCP se realizó durante los meses de Enero-Febrero de 2018, aunque se pueden realizar en cualquier época del año, debido a que el estado de Tabasco cuenta con irradiación directa anual de 2.5 a 3.5 kW h m⁻²
- El CCP tiene la capacidad de monitorear la temperatura del grano, la temperatura del aire interior, la temperatura de la pared interior del tubo absorbedor y puede variar el giro del tubo absorbedor en el intervalo de 0 a 8 rpm.

1.5 Estructura de la Tesis

El documento de Tesis está constituido por cuatro capítulos, a continuación se describen brevemente:

- En el "Capítulo II" denominado "Fundamento teórico" se muestra la base teórica que sirve para entender y sustentar la utilización de la radiación solar en concentradores cilindro parabólico (CCP), el cálculo de la eficiencia del CCP y las principales pruebas fisicoquímicas de la calidad del cacao tostado.
- En el "Capítulo III" denominado "Metodología" se presenta el diseño, simulación, construcción e instrumentación del tostador solar de granos de cacao, así como, el procedimiento experimental del tostado y los procedimientos de prueba para determinar la calidad del grano.
- En el "Capítulo IV" denominado "Resultados y Discusión" se presentan y analizan los resultados obtenidos del trabajo de investigación.
- Finalmente, se presenta la sección de "Conclusiones y Recomendaciones" donde se presentan las principales conclusiones y se establecen recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Fundamento teórico

En este capítulo se describe de manera breve algunos conceptos básicos de la energía solar relacionados con el proyecto del tostador solar de cacao; también se describe el concentrador solar cilindro parabólico que se utilizó como tostador; y se puntualiza en las pruebas fisicoquímicas que se utilizaron para determinar la calidad del tostado de cacao.

2.1 Energía Solar

El sol es una esfera con temperaturas muy elevadas compuesto por diferentes gases con un diámetro de 1.39×10^9 m. El tiempo que tarda en llegar la energía solar a nuestro planeta es de 8 min y 20 s, a una distancia de 1.495×10^{11} m. El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K (Duffie & Beckman, 2013).

La energía total de salida del sol es de 3.8×10^{20} MW que es equivalente a 63 W m^{-2} de la superficie del sol, esta energía se irradia hacia todas direcciones, de la cual solo una pequeña parte de 1.7×10^{14} kW llega a la tierra (Kreith & Kreider, 1978). Sin embargo, incluso con esta pequeña fracción, se estima que 30 min de radiación solar que llega sobre la Tierra equivalen a la demanda mundial de energía durante un año (Kalogirou, 2004).

La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la Tierra da como resultado una intensidad casi fija de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra, se conoce como constante solar G_{sc} que es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo en un área unitaria, medida desde la parte exterior de la atmósfera terrestre en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación. De acuerdo a Duffie & Beckman, (2013), el valor de la G_{sc} es de 1367 W m^{-2} . Esta radiación llega a la tierra en dos formas distintas. La primera forma es la radiación directa que nos llega directamente del Sol, sin haber incidido en su trayectoria de modo que no cambia su dirección y la otra forma es la radiación difusa que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. La radiación global es la suma de la radiación directa más la radiación difusa.

El aprovechamiento de la energía solar se ha utilizado desde hace muchos siglos para diferentes funciones (Kalogirou, 2004), pero con la revolución industrial el desarrollo energético se enfocó en los derivados del petróleo y el carbón (Cruz,

2012). En los últimos años existe un mayor enfoque en el uso de energías alternativas, debido al aumento del precio del petróleo y el efecto que produce al ambiente, un ejemplo es Alemania que producen más del 30% del consumo eléctrico total a partir de la energía solar y la energía eólica (Burger, 2014). La energía solar tiene varias ventajas en comparación con otras formas de energías, es una fuente inagotable y puede suministrar energía sin contaminación ambiental.

Existen muchas aplicaciones de la energía solar, una de las más conocidas es la fotovoltaica que consiste en la conversión de radiación solar en energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos, también la energía solar es usada en plantas de generación de potencia por concentración solar que generalmente se usa para producir vapor que pasa por una turbina y un generador. Los dispositivos solares pueden ser utilizados para iluminar casas de forma natural, para sistemas de enfriamiento, para procesos donde se requiere entregar calor, para producir electricidad y otras aplicaciones.

La transformación de la energía solar en energía térmica es relativamente fácil, debido a que se requiere un objeto que absorba la radiación solar para convertirla en energía térmica. Sin embargo, para hacer eficiente el dispositivo y obtener la temperatura deseada se requiere de técnicas y dispositivos especializados, por ejemplo en el uso de concentradores se requiere láminas de un material específico y con un recubrimiento especial para mejora las condiciones ópticas.

En la actualidad las diferentes tecnologías solares son utilizadas para la generación de energía eléctrica utilizando dispositivos de concentración o para la producción de calor de procesos y uso doméstico, empleando colectores o concentradores con estructuras más ligeras, más pequeñas y un costo inferior en comparación con los de generación de energía eléctrica.

Como puede observarse, el potencial de la energía solar disponible es una fuente renovable y puede aprovecharse para suministrar energía en diferentes procesos. Para este proyecto se utilizó un concentrador solar como sistema de aprovechamiento de la energía solar, por sus características de temperatura alcanzadas, dentro de la cual se encuentra la temperatura requerida para el proceso de tostado de granos de cacao.

2.2 Concentradores solares

El componente más importante del sistema solar es el colector solar que actúa como un intercambiador de calor al convertir ³ la energía de la radiación solar en energía térmica que es transferida al fluido de trabajo que se encuentra en el receptor.

Existen básicamente dos tipos de colectores solares: los estacionarios y los de concentración solar. El colector estacionario tiene la misma área de interceptación y absorción de la radiación solar, mientras que un concentrador solar normalmente tiene una superficie cóncava reflectora que tiene como función interceptar y enfocar la radiación solar en un receptor que es mucho más pequeño que el área de la superficie reflectora, con el fin de aumentar el flujo de radiación.

Los dispositivos de concentración presentan ciertas ventajas y desventajas en comparación con los colectores planos convencionales (Kalogirou, 2013). Las principales ventajas son:

1. El fluido de trabajo puede alcanzar temperaturas más altas en un sistema concentrador en comparación con un sistema de placa plana de la misma superficie de recolección de energía solar. ³ Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.
2. La eficiencia térmica es mayor debido a la pequeña área de pérdida de calor relativa al área del receptor.

3. Las superficies reflectantes son estructuralmente más simples, ya que requieren menos material.
4. Debido al área relativamente pequeña del receptor por unidad de energía solar recolectada, el tratamiento superficial selectivo y el aislamiento al vacío para reducir las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia del colector son económicamente viables.

Algunas de las desventajas principales son:

1. Los dispositivos de concentración prácticamente funcionan con solo radiación directa, por lo que en días nublados no funcionan.
2. Se necesita de un sistema de seguimiento de la trayectoria supuesta del Sol, para aprovechar la mayor captación de la radiación directa y mejorar su eficiencia.
3. Las superficies de concentración pueden perder su capacidad de reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

2.2.1 Tipos de concentradores solares

Los concentradores solares pueden ser clasificados de acuerdo a Kalogirou, (2013) en dos tipos de:

1. Concentración puntual: son dispositivos que tienen orientados todos los espejos hacia un mismo punto con el fin de tener una mayor concentración de radiación solar para conseguir con ello elevadas temperaturas, de los cuales son:

- a) **Torres Centrales:** consiste en un campo de espejos que orienta la radiación hacia una torre concentrando toda la radiación en un punto donde se ubica un receptor (Figura 2.1 a).
- b) **Concentrador parabólico:** consisten en un espejo con forma de antena parabólica que concentra toda la radiación en un punto donde se coloca un receptor/motor (Figura 2.1 b).

2. Concentración lineal: estos dispositivos concentran la radiación solar en toda la línea del receptor que está por encima del concentrador, de los cuales son:

- a) *Concentrador cilindro parabólico*: Este dispositivo consiste en una serie de espejos ³ geometría parabólica (en algunos casos circular), y que por encima de ellos (en la línea focal) se encuentra colocada la tubería con el fluido transportador de calor, la función de los espejos es concentrar la máxima energía posible en los tubos (Figura 2.1 c).
- b) *Concentrador Fresnel reflectivo*: en este dispositivo ³ los espejos son planos y están colocados en el mismo plano horizontal, van girando a lo largo del día o periódicamente según su orientación para ir reflejando los rayos solares sobre la línea focal donde pasa el tubo con el fluido calor-transportador. Es común que estos sistemas cuenten con un segundo sistema concentrador en el receptor para asegurar la máxima captación de la energía solar (Figura 2.1 d).

2.2.2 Seguimiento solar

Debido al movimiento aparente del sol en el cielo, los concentradores solares convencionales deben seguir el movimiento diario del sol. Hay dos métodos por los cuales el movimiento del sol puede rastrearse fácilmente. El primero es el método azimutal que requiere que el dispositivo de seguimiento gire tanto en altitud (cenit) como el ángulo azimutal, es decir, cuando se realiza correctamente, este método permite que el concentrador siga exactamente la trayectoria del sol. Los concentradores solares paraboloídes generalmente usan este sistema. El segundo es el seguimiento de un eje en el que el colector rastrea el sol en una sola dirección, ya sea de este a oeste o de norte a sur. Los concentradores cilindros parabólicos generalmente usan este sistema. Estos sistemas requieren un ajuste continuo y preciso para compensar los cambios en la orientación del sol (Kalogirou, 2013).

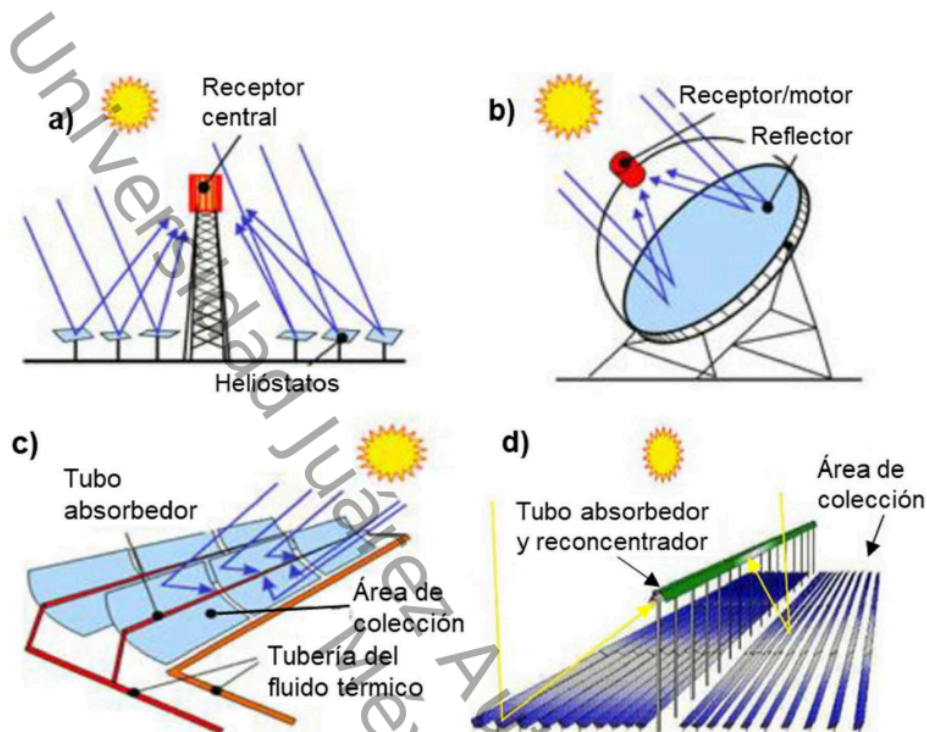


Figura 2.1 Arreglos experimentales de concentradores solares, a) Torres Centrales, b) Concentrador parabólico, c) Concentrador cilindro parabólico, d) Concentrador Fresnel reflectivo. Fuente: Adaptada de Cruz & Montes, (2007).

2.2.3 Concentrador cilindro parabólico

Con el fin de entregar altas temperaturas con una buena eficiencia, un colector solar de alto rendimiento es necesario. Se pueden obtener sistemas con estructuras ligeras y tecnología de bajo coste para aplicaciones de calor de proceso hasta 400°C con concentradores cilindro parabólicos. Una de las características que distingue a este tipo de concentrador es que su superficie parabólica tiene una alta reflectancia para asegurar que la radiación que recibe sea reflejada a lo largo de zona focal.

El tubo absorbedor de un CCP es lineal. Por lo general, se coloca un tubo a lo largo de la línea focal para formar un receptor externo de superficie como se observa en la Figura 2.1 c). El tamaño del tubo, y por lo tanto la relación de concentración, está determinado por el tamaño de la imagen del sol reflejado y las tolerancias de fabricación del CCP. La superficie del receptor está típicamente chapada con un recubrimiento selectivo que tiene una gran absorbencia para la radiación solar, pero una baja emitancia para la pérdida de radiación térmica.

La tecnología CCP es la más avanzada de las tecnologías solares térmicas debido a su considerable experiencia con los sistemas y al desarrollo de una pequeña industria comercial para producir y comercializar estos sistemas. Los CCP se construyen en módulos que se sostienen desde el suelo mediante simples pedestales en cada extremo (Kalogirou, 2013).

Los CCP es una de las tecnologías solares más madura para generar calor a temperaturas de hasta 400°C, las aplicaciones más importantes son para la generación de energía eléctrica y calor de proceso. La instalación más importante de este tipo de sistema son las centrales eléctricas del sur de California con una capacidad total de instalación de 354 MW (Kearney & Price, 1992); y otra importante instalación es la instalada en la Plataforma Solar de Almería con propósitos principalmente de experimentación, la capacidad total de instalación es de 1.2 MW.

6 Un mecanismo de seguimiento debe ser fiable y capaz de seguir al sol con cierto grado de precisión, devolver el colector a su posición original al final del día o durante la noche, y también realizar un seguimiento durante los periodos de nubosidad intermitente. Además, se utilizan mecanismos de seguimiento para la protección de colectores, es decir, que giran el colector fuera de foco para protegerlo de las condiciones ambientales y de trabajo peligrosas, como la ráfaga de viento, el sobrecalentamiento y el fallo del mecanismo de flujo de fluido térmico (Kalogirou, 2004).

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se seleccionó el CCP como el sistema más adecuado porque se encuentra en el intervalo de temperaturas para el proceso de tostado de cacao, además de ser un dispositivo estudiado ampliamente, de fácil construcción en comparación con otro tipo de concentradores, y con el cual podrían reducirse los costos de consumo de energía.

2.3 Eficiencia de concentradores solares

La eficiencia de los concentradores cilindro parabólico se divide en dos, la eficiencia óptica y la eficiencia térmica. La eficiencia óptica es la razón entre la energía absorbida por el tubo receptor y la energía incidente en el área del reflector cilíndrico parabólico. Los elementos que afectan la eficiencia óptica del CCP son: la geometría y los efectos implícitos en la construcción del CCP; y las propiedades ópticas como la reflectancia (ρ) del colector, absorptividad (α) y emisividad (ϵ) del tubo receptor. La eficiencia óptica (η_o) se puede obtener mediante la Ecuación (2.1).

$$\eta_o = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan(\theta) \cos(\theta))] \quad (2.1)$$

Donde: θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar, γ es el factor de intercepción que se refiere a las pérdidas ópticas por condiciones ambientales y de construcción; y A_d es la relación entre el área perdida por defectos del borde y el área de apertura, se puede obtener con la Ecuación (2.2)

$$A_d = (2/3 W_a h_p + f W_a [1 + \frac{W_a^2}{48 f^2}]) / A_a \quad (2.2)$$

Donde: W_a , h_p y A_a son la apertura, el lado recto de la parábola y el área de concentración del CCP respectivamente.

La eficiencia térmica representa la relación entre la energía útil que recibe el tubo absorbedor y la energía recibida en el colector del CCP. Esta se expresa mediante la Ecuación (2.3) de acuerdo a Tzuc, *et al.*, (2016).

$$\eta = Q_u / A_a \int_0^{t_r} I dt = (m_c C_p \Delta T + m_{ev} h_{ev}) / A_a \int_0^{t_r} I dt \quad (2.3)$$

Donde I es la radiación solar directa que recibe el tubo absorbedor, Q_u es la energía útil, A_a es el área de captación solar, m_c es la masa de cacao, C_p es el calor específico del cacao, ΔT es la diferencia de temperatura entre el estado final e inicial del cacao, m_{ev} es la masa de agua evaporada y h_{ev} es la entalpia de evaporación.

2.4 El cacao

El chocolate se deriva del grano de cacao, que se obtiene de la fruta del árbol de cacao, *Theobroma cacao* L, este es un árbol tropical con una altura promedio de 6 m, con hojas de 30 cm de longitud y flores rosas que se forman en las ramas y en el tronco del árbol. Su fruto es en forma de baya, de 30 cm de longitud y 10 cm de diámetro.

El cacao es uno de los productos agrícolas de exportación más importantes del mundo y constituye la columna vertebral de las economías de algunos países de África occidental, América del Sur y Asia sudoriental. Es la principal fuente de divisas y una gran fuente de ingresos para muchas familias en la mayoría de los países en desarrollo del mundo. En Ghana, el cacao es la segunda fuente de divisas y se calcula que 1 millón de agricultores y sus familias dependen de él para su subsistencia (Afoakwa, 2014). Los principales productores del cacao se encuentran en África Occidental, América del Sur y Centro América, y del suroeste de Asia. Los principales países productores de cacao más grandes son Costa de Marfil, Ghana, Indonesia, Nigeria, Ecuador, Camerún, Brasil y Malasia. La producción de estos países es de alrededor de 4.23 millones de toneladas, representan aproximadamente el 95% de la producción mundial (Afoakwa, 2016).

México dejó de ocupar los primeros lugares de producción de cacao, produciendo solo 28,863 ton cubriendo el 41.22% de la demanda nacional. Los principales estados productores en México son Tabasco y Chiapas, ambos estados producen

más del 90% de la producción total. Las principales variedades de cacao que se siembra en México resaltan dos: el criollo, del cual se obtienen granos de calidad superior; y el forastero, del cual se originan granos de menor calidad. Pero aun así, los dos clasifican en granos de alto nivel aromático y sabor, recibiendo la denominación de "cacaos aromáticos". En el caso específico de Tabasco la ¹⁷variedad que mayormente se cultiva es el forastero, sobre todo por la resistencia que tiene a las enfermedades y por su mayor rendimiento.

2.5 Pruebas fisicoquímicas

La calidad del cacao tostado está en función de la poscosecha y las variedades o cultivares, además de las condiciones solicitadas por los compradores. El parámetro de control es la humedad, que debe estar en un intervalo de 1.5 - 2 %. En función de este límite se juega con las condiciones de operación para hacer variar las otras características físicas, químicas y sensoriales. Por otro lado los mercados gourmet buscan características de notas frutales, florales, etc.; y para este tipo de mercado la relación entre mediciones químicas y sensoriales es muy atractiva, pero subjetiva. Dentro de las pruebas fisicoquímicas más importantes se encuentra el contenido de humedad, las pruebas de fenoles totales, la acidez total y el pH; estos parámetros condicionan la astringencia, amargura y acidez. Por lo cual, en este proyecto se realizaron estas pruebas fisicoquímicas para determinar la calidad del grano tostado con energía solar. A continuación, se describen brevemente las principales características de las pruebas fisicoquímicas antes mencionadas.

2.5.1 Humedad

La humedad es el porcentaje de agua en la de cacao y se determina por el método gravimétrico indirecto por desecación, este método consiste en la pérdida de masa de la muestra debida a la evaporación de agua en estufa de aire caliente. La prueba de humedad se realiza empleando una estufa y balanza analítica. Para esto, se preparan las muestras, se pesa inicialmente la masa de la muestra en

una balanza analítica, posteriormente se secan totalmente en la estufa, se dejan enfriar y se pesa la masa final de las muestras. Las muestras se secan totalmente en una estufa de aire caliente a 103°C por 24 h. El contenido de humedad (% humedad) se puede obtener mediante la Ecuación (2.4).

$$\% \text{ humedad} = (m_i - m_f / m_i) \times 100 \quad (2.4)$$

Donde m_i es la masa de la muestra antes de entrar en la estufa y m_f es la masa de la muestra al salir de la estufa.

En el diagrama de la Figura 3.16 del Capítulo 3 se presenta el procedimiento de obtención del contenido de humedad de la muestra.

2.5.2 pH

El pH es la forma de medir cuantitativamente la acidez o alcalinidad de una disolución y es una cantidad adimensional. El pH indica la concentración de ion de hidrógeno $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias (Chang & Goldsby, 2013). Por lo tanto, a mayor valor del pH, menor concentración de hidrógeno y menor acidez de la solución. Las escalas del pH están comprendidos entre 0 a 14 (Figura 2.2), el valor 7 muestra una solución neutra, el valor de $pH < 7$ corresponden a disoluciones ácidas y el valor $pH > 7$ indican soluciones básicas o alcalinas (Westcott, 1978). En la Tabla 2.1 se muestran los valores de pH para algunos alimentos. El pH tiene un valor importante en la industria, en la medicina, en el sector de alimentación y en la agricultura. Se mide sobre todo en soluciones acuosas, extractos pero también en productos con consistencia sólida.

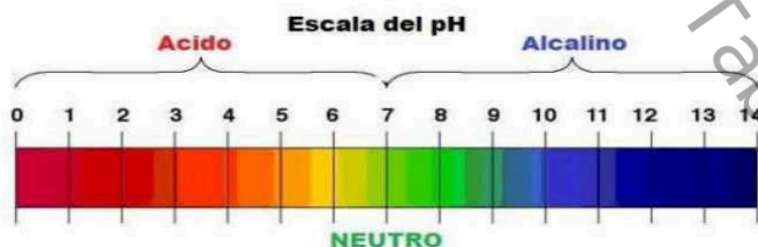


Figura 2.2 Escala del pH

El pH de los alimentos se puede determinar con diferentes métodos, uno de los más usado y preciso es utilizando un potenciómetro, este equipo tiene un sensor de bombilla de vidrio que se introduce en la disolución, en el bulbo se encuentran dos electrodos, uno calibrado y otro sensible a la diferencia de Hidrógeno, de modo que se activa una diferencia de potencial que es representada en valor de pH en la pantalla digital del equipo. En el diagrama de la Figura 3.17 del Capítulo 3 se presenta el procedimiento general de obtención de pH.

Tabla 2.1 Valores de pH para algunos alimentos.

Fuente: Adaptado de Cocina Solar (2017).

Frutas	PH	Verduras y hortalizas	pH
Grano de cacao	5 a 5.5	Zanahoria	4.9 a 5.2
Manzanas	3.4 a 3.9	Zanahoria	4.9 a 5.2
Higos	3.3 a 4.0	Tomate	4.2 a 4.9
Plátano	4.5 a 5.2	Remolacha	4.9 a 5.6
Limón	2.2 a 2.4	Col	5.2 a 6.0
Lima	1.8 a 2.0	Coliflor	5.6
Fresas	3.0 a 3.5	Apio	5.7 a 6.0
Melón	6.3 a 6.7	Pepino	5.1 a 5.7
Papaya	5.2 a 5.8	Berenjena	4.5 a 5.3

2.5.3 Acidez total

La acidez es la determinación de ¹¹ácidos orgánicos presentes en los alimentos que influyen en el sabor, color y la estabilidad de los mismos. La acidez se determina mediante una valoración (volumetría) con una sustancia base, para el caso de la muestra de los granos del cacao el reactivo base es hidróxido de sodio NaOH (0.1 N). La prueba de Acidez consiste en agregar a la disolución la sustancia base a través de una pipeta automática hasta llegar a un pH requerido medido con un potenciómetro. Los resultados se expresan en mililitros de hidróxido de sodio necesarios para neutralizar el ácido libre contenido en un gramo de granos de cacao. La acidez libre se puede obtener mediante la Ecuación (2.5) y la acidez total se puede obtener a partir de la Ecuación (2.6), que es el resultado de la

acidez libre multiplicado por el coeficiente de Zeller (1/0.579). En el diagrama de la Figura 3.18 del Capítulo 3 se muestra el procedimiento de obtención de la acidez total.

$$Ac_L = (V_{rb})/m_c \quad (2.5)$$

$$Ac_t = Ac_L(1/0.5792) \quad (2.6)$$

Donde: Ac_L es la Acidez libre, Ac_t es la acidez total, V_{rb} es el volumen del reactivo base y m_c es el peso de la muestra de cacao.

2.5.4 Grasa

El objetivo del desgrasado es eliminar la grasa de la muestra para dejar la muestra sin grasa y posteriormente determinar la cantidad de fenoles totales. La determinación de grasa se realiza por el método de extracción Soxhlet de acuerdo con la NMX-F-089-S-1978. La función del método es que el disolvente (éter de petróleo) contenido en el matraz llegue al punto de ebullición por consecuencia de calor suministrado, y que este suba en su forma gaseosa por el cuello del matraz y llegue al refrigerante y se condense, esto se repite de manera cíclica hasta desgrasar totalmente la muestra. La Figura 2.3 presenta las partes del equipo de extracción Soxhlet y su funcionamiento. Este procedimiento se conoce como extracción solido-liquido. La cuantificación se realiza con la Ecuación (2.7). En el diagrama de la Figura 3.19 del Capítulo 3 se muestra el procedimiento de obtención del porcentaje de grasa.

$$\% \text{grasa} = ((m_{mg} - m_{msg})/m_c) \times 100 \quad (2.7)$$

Donde: m_{mg} es el peso del matraz con la grasa de la muestra, m_{msg} es el peso del matraz sin muestra y m_c es el peso de la muestra de cacao.

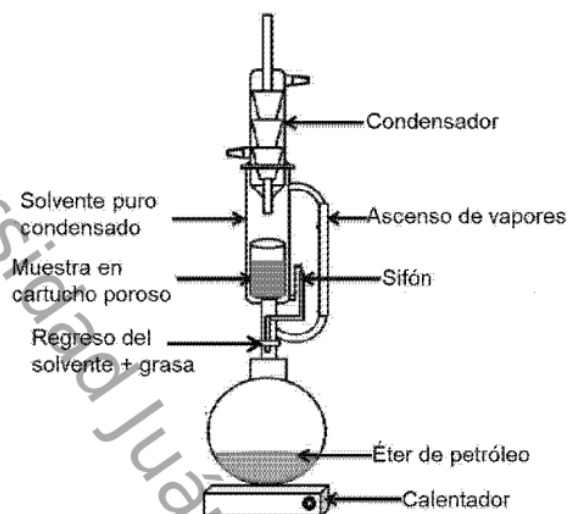


Figura 2.3 Equipo de extracción Soxhlet. Fuente: Adaptado de Kofi & Salifu (2017).

2.5.5 Fenoles totales

Los fenoles son sustancias que poseen un anillo aromático, con uno o más grupos de hidróxidos. Uno de los métodos más usados para evaluar la cantidad de fenoles totales es el de Folin-Ciocalteu, consiste en la capacidad para reaccionar con agentes oxidantes. El agente de Folin-Ciocalteu contiene molibdato y tungstato sódico que se activan con cualquier tipo de fenol. La capacidad de fenoles de los extractos es expresado en mg/g de peso seco de cacao, apoyándose en la curva de calibración del material patrón que en este caso es ácido gálico, el resultado se expresa en: "Unidades de ácido gálico equivalentes por gramo de extracto de cacao (García, & Cisneros, 2008). En la Figura 2.4 se presenta un ejemplo de una curva de calibración reportada por Avella, *et al.*, (2008) para ácido gálico. De donde a partir de una ecuación de ajuste de los datos experimentales, como la que se muestra en la figura, se obtiene el valor de fenoles totales. En el diagrama de la Figura 3.20 del Capítulo 3 se presenta el procedimiento general de obtención de contenido de fenoles totales

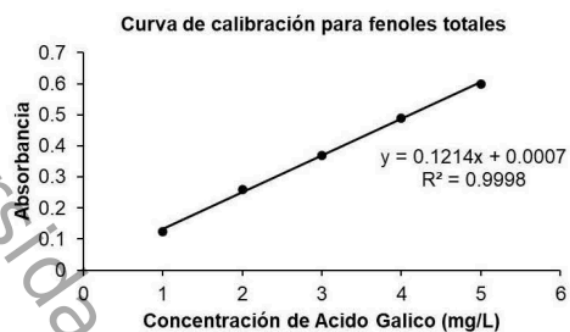


Figura 2.4. Ejemplo de curva de calibración de contenido de fenoles.

Fuente: adaptada de Avella, *et al.*, (2008).

Capítulo III

Metodología

En este Capítulo se presentan consideraciones y especificaciones que se utilizaron en este proyecto para el desarrollo, diseño, construcción e instrumentación del CCP, así como, los procedimientos experimentales que se consideraron para el proceso de tostado solar y para la determinación de las propiedades fisicoquímicas para establecer la calidad del grano de cacao tostado.

3.1 Diseño y construcción del CCP

El diseño y construcción del CCP se dividió en tres secciones principales: área de captación solar, el tubo absorbedor o receptor, y el sistema de seguimiento solar.

- ❖ **Área de captación solar:** Su objetivo es recibir la radiación solar directa y concentrarla de manera lineal en una superficie (absorbedor). Es construido con una lámina que tiene la propiedad de alta reflectancia y forma en una de sus dimensiones una parábola.
- ❖ **El tubo absorbedor** o contenedor de granos: Es la parte más importante del CCP, debido a que la eficiencia óptica y térmica depende en gran manera al diseño y el material del receptor. Es un tubo concéntrico con un recubrimiento que tiene una alta absorptividad y una baja emisividad.
- ❖ **El sistema de seguimiento solar:** El seguimiento solar tiene como fin aprovechar la radiación solar directa durante el día de manera que esa radiación llegue perpendicularmente al reflector cilindro parabólico y se refleje al tubo absorbedor de manera continua. Los mecanismos de accionamiento que mueven al colector pueden ser eléctricos (apropiado para equipos pequeños), hidráulicos (para lazos de colectores) y mecánicos (ej: reloj de pesas).

3.1.1 Reflector Cilíndrico Parabólico (RCP)

El dimensionamiento del RCP se realizó calculando el foco, para lo cual, se calculó la longitud del lado recto y del lado curvo (Venegas, *et al.*, 2012). García, (2017) presenta el diseño del área de colección, en el cual consideraron las dimensiones comerciales de la lámina de aluminio reflectivo (122 cm × 61 cm) y la ecuación de la parábola con vértice en el origen para tres posibles distancias focales: 25, 30, y 35 cm. Lo anterior, se realizó para identificar la distancia focal que maximice el aprovechamiento de la energía solar. La construcción del área

de captación o RCP, fue realizada con una lámina de aluminio con reflectancia de 90% con un espesor de 0.5 mm, soportada en una estructura de aluminio. La estructura fue forjada de acuerdo a las dimensiones calculadas y las dimensiones de la parábola. Para mantener la forma adecuada, se calcularon los puntos de intersección con la asistencia de una hoja de cálculo con respecto a la ecuación de la parábola, $y^2=4fx$, encontrando el ángulo de apertura y foco para la máxima captación solar, que fueron 61 cm y 30 cm respectivamente. En la Figura 3.1 se presenta una fotografía con el RCP que se acoplo al sistema de seguimiento solar.

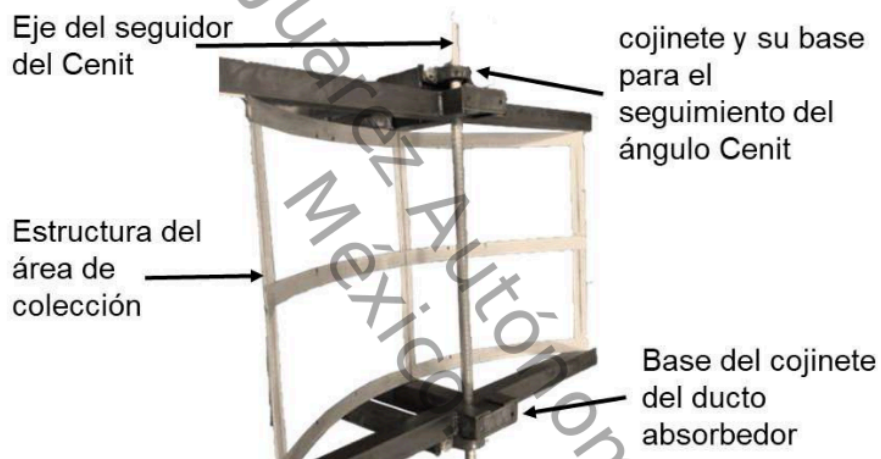


Figura 3.1. Estructura del área de captación. Fuente: propia.

La base del área de captación fue manufactura con solera de aluminio y con una estructura de soporte de ángulos de acero. La selección de estos materiales y el sistema de giro se realizó utilizando una metodología de diseño estructurado, mediante el establecimiento de alternativas funcionales y criterios de evaluación, los cuales fueron comparados y evaluados en una matriz de decisión donde se seleccionan las alternativas funcionales más adecuadas, es decir, las que mejor satisfacen el propósito y funcionalidad del equipo experimental. Los criterios de selección considerados fueron en general: propiedades térmicas, resistencia, durabilidad, disponibilidad, facilidad de operación, estética, precisión, costo, entre

otros. El soporte del área de captación cuenta con un par de chumaceras de 2.54 cm (1 pulgada) sobre la estructura del soporte de acero, que permitirán movilidad en el ángulo azimutal. La estructura de la parábola se utilizará para el seguimiento del sol en el ángulo del Cenit.

3.1.2 El tubo absorbedor o receptor

El tubo absorbedor fue diseñado realizando un balance de energía sobre el colector cilindro-parabólico y el tubo absorbedor de acuerdo a Ortiz, (2016). El balance de energía incluyó la radiación solar directa incidente normal a la superficie del colector, las pérdidas ópticas tanto del colector como del tubo absorbedor, las pérdidas térmicas del tubo absorbedor y la ganancia de calor en el fluido térmico.

Para el diseño del tubo absorbedor se realizó una simulación en un software de Dinámica de Fluido Computacional (CFD), con el software Fluent® (versión 6.0), donde se analizaron dos propuestas de diseño del tubo absorbedor, considerando como parámetro de referencia las dimensiones del área de captación de radiación solar. En el Anexo 1 se presenta un artículo de divulgación donde se describe a detalle los resultados obtenidos de la primera propuesta, de la cual se obtuvieron los parámetros de mejora en el diseño del tubo absorbedor. Lo anterior, debido a que en la primera propuesta se encontraron zonas de estancamiento de flujo de aire, lo que ocasionaba un comportamiento no homogéneo en la distribución de la temperatura en el interior, lo que afectaría la calidad del tostado. Con los antecedentes de la primer propuesta se rediseño el tubo absorbedor. A continuación se presenta el procedimiento y los resultados obtenidos del diseño de la segunda propuesta.

El diseño del contenedor de grano de cacao se muestra en la Figura 3.2. El material del tubo absorbedor es de lámina de acero inoxidable grado 304, este

material es adecuado para la industria alimentaria. El diámetro del tubo absorbedor es de 10 cm, 60 cm de largo y un espesor de 1.6 mm. El tubo absorbedor tiene tres divisiones a lo largo del tubo, a las cuales denominamos cámaras, con una separación de 20 cm por cada una de ellas.

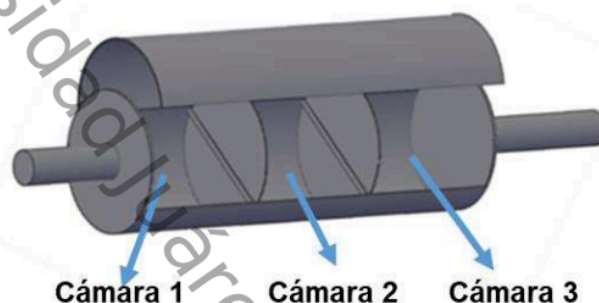


Figura 3.2 Diseño del receptor del CCP. Fuente: propia.

Las propiedades consideradas en la simulación para el acero inoxidable fueron las siguientes: una densidad de $\rho=8030 \text{ kg m}^{-3}$, $C_p=502.48 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y una conductividad térmica de $k=16.27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. El tubo absorbedor se analizó como un sistema cerrado y con diferentes valores de velocidad angular 20, 25 y 30 rpm, este movimiento es para aumentar la homogeneidad del tostado del grano. Además, considerando que la irradiancia que se concentra en la parte inferior del tubo absorbedor logra obtener una temperatura de manera uniforme en toda la parte inferior, las variables para esta simulación fueron 120, 140 y 160°C, estas temperaturas están dentro del intervalo para realizar el tostado de cacao el cual es de 90 a 170°C (Afoakwa, 2016). La temperatura ambiente considerada fue de 30°C.

Para el análisis se realizó el dibujo en 3D del tubo absorbedor con el software Gambit® (versión 6.0), considerando las dimensiones mencionadas anteriormente, añadiendo tres paredes interiores de manera circunferenciales para ver el comportamiento de la temperatura en el interior del tubo absorbedor. En la Figura 3.3 se muestra el mallado que se realizó con este mismo software.

El mallado tiene 192, 655 nodos y con un radio de aspecto de hasta 4. Posteriormente, se especificaron las condiciones de frontera, donde el exterior del tubo absorbedor y las divisiones de cada cámara se definieron como pared, el interior del tubo se considera como fluido que en este caso es aire y por último, el dibujo mallado se exporto como archivo *.msh para su procesamiento en el software Fluent.

¹ Para el análisis en Fluent el dibujo se escaló a dimensiones reales, para luego seleccionar los modelos a utilizar, en este caso se seleccionó la ecuación de energía y la condición de flujo laminar para el análisis del comportamiento del fluido. Posteriormente, se colocaron los valores de operación (como las temperaturas, la velocidad angular, el efecto de la gravedad, las propiedades del aire, entre otras) y las condiciones de frontera (material, flujo másico, propiedades de los materiales, entre otros).

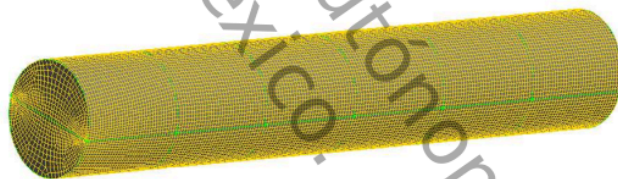


Figura 3.3 Mallado del tubo absorbedor en Gambit. Fuente: propia.

Posteriormente realizo la simulación, con un análisis de 10000 iteraciones reportadas cada 10, cuyo proceso se detuvo hasta que las ecuaciones de continuidad, energía y momento convergen, es decir, alcanzan los valores de residual establecidos. Para la solución del problema se definió el criterio de convergencia de 1×10^{-8} para todas las ecuaciones gobernantes. En la Figura 3.4 se observa el comportamiento original de los residuales hasta su convergencia. En todos los casos la convergencia se dio hasta las 750 iteraciones.

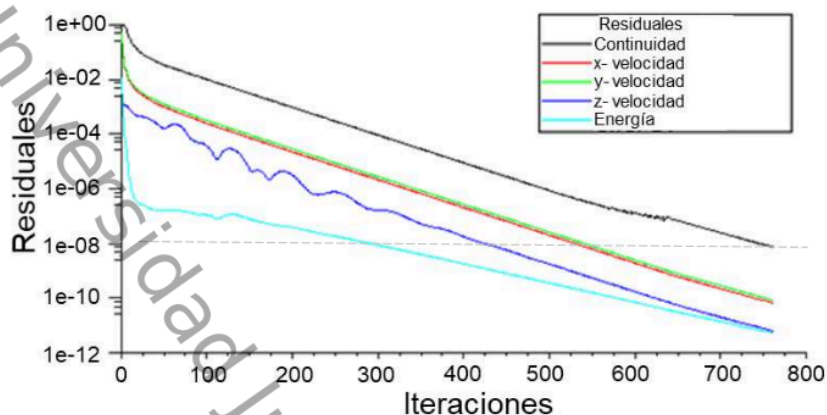


Figura 3.4 Comportamiento de los residuales. Fuente: propia.

En la Figura 3.5 se muestran las simulaciones a diferentes temperaturas desde 120°C a 160°C. En las pruebas de 20 a 30 rpm no se observaron cambios significativos en la distribución de la temperatura como se puede observar en el resumen de la Tabla 3.1. Las gráficas mencionadas se encuentran a una revolución fija. En las gráficas se encontró el mismo patrón de comportamiento, donde la temperatura es casi totalmente uniforme de manera lineal y circunferencial, a excepción de las pared frontal y trasera donde se observó un ΔT de 29°C para la Figura 3.5 (a), un ΔT de 35°C para la Figura 3.5 (c) y un ΔT de 41°C para la Figura 3.5 (e).

Los resultados nos muestran que el diseño del tubo absorbedor cuenta con una adecuada uniformidad de la temperatura deseada. Aunque en la Figura 3.5 (a) las temperaturas cercanas a la pared frontal y trasera llegaron hasta 91°C, esta temperatura se encuentra en el límite del intervalo del tostado, por lo que pudiera afectar el tostado de los granos cercanos a dichas fronteras. La mejor propuesta que se obtuvo fue la de la simulación que se muestra en la Figura 3.5 (e), ya que la temperatura mínima alcanzada fue de 119°C, siendo esta propuesta aseguraría el tostado de los granos de cacao.

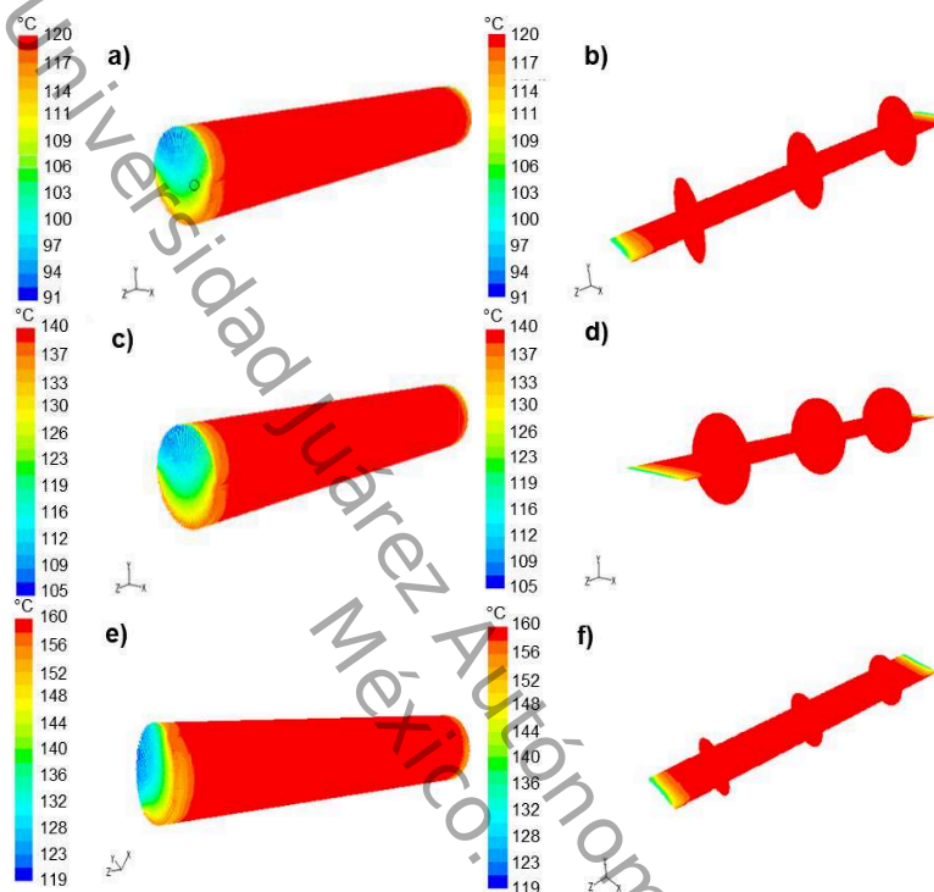


Figura 3.5. Simulación del tubo absorbedor, a) y b) exterior e interior del tubo absorbedor a 120°C y 25 rpm; c) y d) exterior e interior del tubo absorbedor a 140°C y 25 rpm; y e) y f) exterior e interior del tubo absorbedor a 160°C y 25 rpm.

Fuente: propia.

Tabla 3.1 Resumen de las simulaciones realizadas. Fuente: propia.

RPM	Temperatura (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	No. Iteraciones
20	120	120	92	750
	140	140	105	750
	160	160	118	750
25	120	120	91	750
	140	140	105	750
	160	160	119	750
30	120	120	93	750
	140	140	106	750
	160	160	119	750

El tubo absorbedor se construyó de un diámetro de 10 cm y 60 cm de largo. El tubo absorbedor se cortó transversalmente con el fin de abrirse para depositar los granos, además, en su interior se colocó dos separaciones que permitan una mejor distribución del grano al interior. Las mitades del tubo absorbedor son unidas a través de dos bisagras y para cerrar el cilindro con los granos se utilizó un par de broches de presión. Para finalizar con la construcción del tubo se colocó dos soportes en cada extremo para que puedan adaptarse en una chumacera, con el propósito de que el tubo pueda rotar para el buen tostado del cacao (Figura 3.6).

3.1.3 El sistema de seguimiento solar

El sistema de seguimiento solar está constituido por dos secciones de acuerdo a Gómez, (2013): 1) Estructura del seguimiento solar, y 2) sistema de seguimiento solar para los ángulos cenit y azimutal. En el diseño de la estructura se consideró que la base y soporte tuviera las características de alta resistencia y movilidad, el material que se seleccionó fue PTR de acero de 5.08 cm (2").

En el diseño del seguimiento solar se consideró que tuviera las siguientes características: altura, espacio, tamaño y movilidad adecuada. El diseño del seguimiento solar se consideró que tenga dos grados de libertad donde pueda

seguir el aparente desplazamiento del sol por el ángulo del Cenit y el ángulo azimutal. Para el ángulo azimutal se consideró la latitud y la inclinación en la que se encontrará el concentrador, el diseño de este sistema de seguimiento consta de un sistema de cambio de inclinación de manera manual; esto debido a que el ángulo azimutal cambia muy poco cada día del año, por lo que no requiere un seguimiento horario. Para el ángulo cenit se diseñó unos soportes móviles, con los cuales se podrá sostener el mismo, para girar el ángulo necesario para obtener la mayor captación de irradiación solar durante el transcurso de cada día. En la Figura 3.6 se presenta la estructura para el seguimiento del ángulo cenit y el ángulo azimutal.



Figura 3.6 Estructura del seguimiento cenit y azimutal. Fuente: propia.

3.2 Instrumentación del CCP

La instrumentación del CCP se realizó en cuatro secciones principales: 1) el sistema de automatización del movimiento para el seguimiento solar, 2) la medición de las variables de temperatura en el tubo absorbedor y el grano de cacao, y 3) las variables meteorológicas (Temperatura ambiente e Irradiancia solar global).

3.2.1 Sistema de automatización para el seguimiento solar

Para el sistema de movimiento se diseñó y calculó las dimensiones de un conjunto de engrane helicoidal y tornillo sin fin, engranes cónicos y engranes rectos para el seguimiento del ángulo cenit y azimutal. El conjunto de engranes helicoidal y tornillo sin fin se utilizan para la transmisión del movimiento entre dos árboles que se cruzan sin cortarse, normalmente formando un ángulo de 90° . Los tornillos sin fin se manufacturó en un torno convencional, mientras que los engranes se manufacturó en una impresora 3D ultimaker. Uno de los engranes helicoidales se acoplo al sistema de seguimiento con un soporte de Nylamid para el seguimiento del ángulo azimutal, y el otro engrane se acoplo a un disco de aluminio para el seguimiento del ángulo cenit.

Para el movimiento automático del sistema de engranes logrando un seguimiento solar, se utilizó dos motores de pasos que permiten seguir la trayectoria solar. El primer motor mueve uno de los engranes proporcionando un movimiento acorde a la trayectoria del sol sobre el firmamento a una velocidad de 15° por hora. Mientras que el segundo motor, proporciona un movimiento al tubo absorbedor con la finalidad de obtener un tostado homogéneo, en un intervalo de velocidad de 0 a 8 rpm. Para este movimiento automático, como se muestra en la Figura 3.7a, se utilizaron dos motores de paso nema 23 bipolares de 1.8° DEG 1.9 N m acoplados cada uno con un driver y un sistema de control (arduino), como se

muestra en la Figura 3.7b, alimentados con una fuente de poder de 24 V. La programación de ambos motores en el prototipo se realizó con el software Mach3® (versión 3,041). En la Figura 3.6 se presenta un esquema del CCP construido, incluyendo el sistema de movimiento automático.

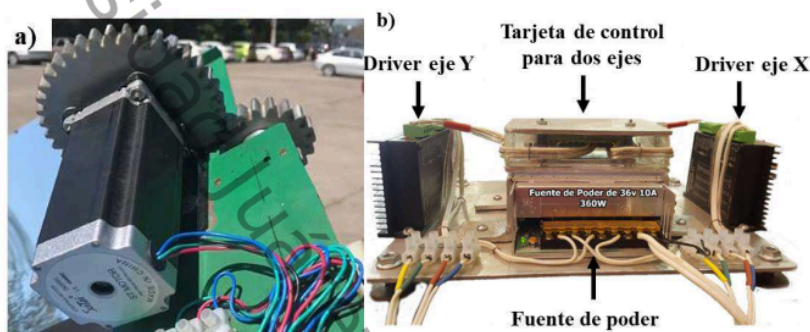


Figura 3.7 a) Motor NEMA 23 y b) sistema de control de motores. Fuente: propia.

3.2.2 Medición de temperatura en el CCP

Para medir la temperatura en el interior del tubo absorbedor se utilizaron termopares tipo T con incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, calibrados considerando la norma ASTM E-230-17. Los termopares tipo T están conformados por unión de Cobre-Constantán. Para la instrumentación del interior del tubo absorbedor se realizó una perforación en el centro del eje que mueve el contenedor de los granos de cacao para introducir los termopares, como se muestra en la Figura 3.8. Lo anterior, con el fin de evitar que se enredaran los cables por el giro del mismo, posteriormente, se realizó una programación con el software Mach3 para realizar dos giros en favor de las manecillas del reloj y luego alternar dos giros en contra de las manecillas del reloj, esto se realiza de manera cíclica hasta terminar el tiempo del tostado.

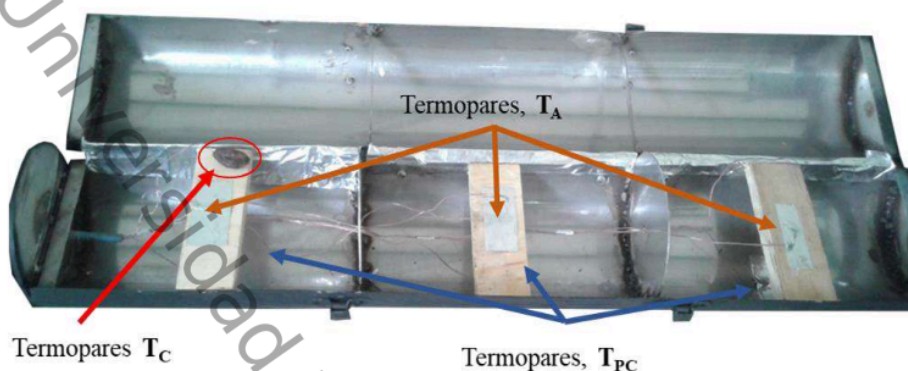


Figura 3.8 Instalación de termopares. Fuente: propia.

En el interior del tubo absorbedor se instalaron nueve termopares, tres termopares en cada cámara del tubo absorbedor. En cada cámara, un termopar se colocó en la pared interior para medir la temperatura del tubo absorbedor, un segundo termopar se ubicó a una altura media, sobre una base de madera para medir la temperatura del aire y un tercer termopar se instaló en el interior de un grano de cacao con el fin de medir la temperatura del grano. En la Figura 3.8 se presenta una imagen donde se muestra la instalación y ubicación de los termopares.

La calibración de los termopares tipo T se realizó en el intervalo de temperaturas de 40°C y 80°C de acuerdo al procedimiento establecido por la norma ASTM E-230-17. La calibración consistió en introducir los termopares en un baño térmico bajo condiciones preestablecidas de temperatura y monitorear el comportamiento de cada termopar, mediante un sistema de adquisición de datos. En la Figura 3.9 se muestran el sistema de adquisición de datos y el baño térmico usados para la calibración. En los siguientes párrafos se describe el procedimiento de calibración.



Figura 3.9 Equipo de calibración. Fuente: propia.

Antes de iniciar el procedimiento de calibración de los nueve termopares, los cables de un extremo del cable termopar se unieron por medio de soldadura para ser introducidos al baño térmico. El otro extremo del cable quedaron separados con una ligera capa de estaño para ser conectados a la tarjeta del multímetro (sistema de adquisición de datos). Se realizaron dos pruebas de calibración con la ayuda del software Agilent BenchLink Data Logger 3. Para la Prueba 1, el baño térmico se fijó a 40°C, se esperó a que se alcanzara y estabilizará la temperatura, para posteriormente iniciar con las mediciones durante 30 minutos. Este proceso se repitió para las temperaturas de baño térmico a 80°C (Prueba 2).

Al finalizar las pruebas se analizaron los datos obtenidos y se obtuvieron los valores que se presentan en la Tabla 3.2, la cual contiene los promedios de las temperaturas medias de cada termopar para las temperaturas de prueba del baño térmico, así como, la desviación estándar de cada una de ellas. Con los resultados obtenidos, se obtuvo un ajuste lineal de los datos de temperatura medidos con el sistema de adquisición de datos y los valores de temperatura que proporcione el sensor del baño térmico. Estos pares de datos fueron graficados para posteriormente con la herramienta Matlab® (versión 2011) calcular los coeficientes del polinomio de primer grado y obtener el Error Estándar de Estimación (EEE). En la Tabla 3.3 se presenta un concentrado de las ecuaciones,

de ajuste y el error estándar de estimación obtenido para cada sensor de temperatura (termopar). Estos polinomios son ingresados en el software de adquisición de datos para considerar su incertidumbre de medición.

Tabla 3.2 Temperatura promedio y desviación estándar de los termopares.

Fuente: propia.

Temperatura de referencia (°C)	Temperatura promedio (°C) y desviación estándar de los termopares		
	1	2	3
39.751	39.197±0.034	39.518±0.023	39.336±0.025
79.492	78.553±0.038	79.323±0.031	78.917±0.029
	4	5	6
39.751	39.508±0.021	39.459±0.018	39.501±0.014
79.492	79.305±0.021	79.298±0.019	79.255±0.016
	7	8	9
39.751	39.252±0.014	39.419±0.010	39.413±0.013
79.492	78.658±0.017	79.445±0.014	79.279±0.015

Tabla 3.3 Ecuación de ajuste y EEE de los termopares. Fuente: propia.

Número del termopar	Ecuación de ajuste $Y = ax+b$		EEE
	a	b	
1	1.010	0.171	0.007
2	0.998	0.297	0.005
3	1.004	0.256	0.005
4	0.999	0.299	0.004
5	0.998	0.389	0.003
6	0.999	0.263	0.003
7	1.009	0.165	0.003
8	0.993	0.61	0.002
9	0.997	0.462	0.003

3.2.3 Medición de variables meteorológicas

Las mediciones meteorológicas que se midieron fueron la temperatura ambiente y la irradiancia global. La temperatura ambiente fue medida utilizando un sensor RTD (PT100 clase B) con incertidumbre de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, fue calibrado de acuerdo a la

metodología descrita en la sección anterior, y su ecuación de ajuste fue $T_{amb} = (R/100 - 1) / 0.00385$. En la Figura 3.10a se muestra la configuración del sensor de temperatura ambiente, el cual es resguardado con una envoltente que impide el efecto de la radiación directa y difusa sobre el sensor, además de proteger al sensor de las variaciones por corrientes de aire. La irradiancia global se midió con un piranómetro de primera clase con una incertidumbre de $\pm 20 \text{ Wm}^{-2}$, como se observa en la Figura 3.10b.

Las mediciones de las variables de temperatura en el tubo absorbedor, la temperatura del grano de cacao, y las variables meteorológicas (temperatura ambiente e Irradiancia solar global) se monitorearon y registraron utilizando un multímetro keysight 34972^a con mediciones a intervalos de 1 minuto. En la Figura 3.11 se presenta una fotografía del sistema experimental completo.



Figura 3.10 Instrumentación meteorológica, a) Sensor de temperatura ambiente y b) Piranómetro para medir la radiación global. Fuente: propia.

3.3 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se dividió en dos secciones, las pruebas de tostado bajo incidencia de radiación solar y las pruebas fisicoquímicas del grano tostado para evaluar su calidad.

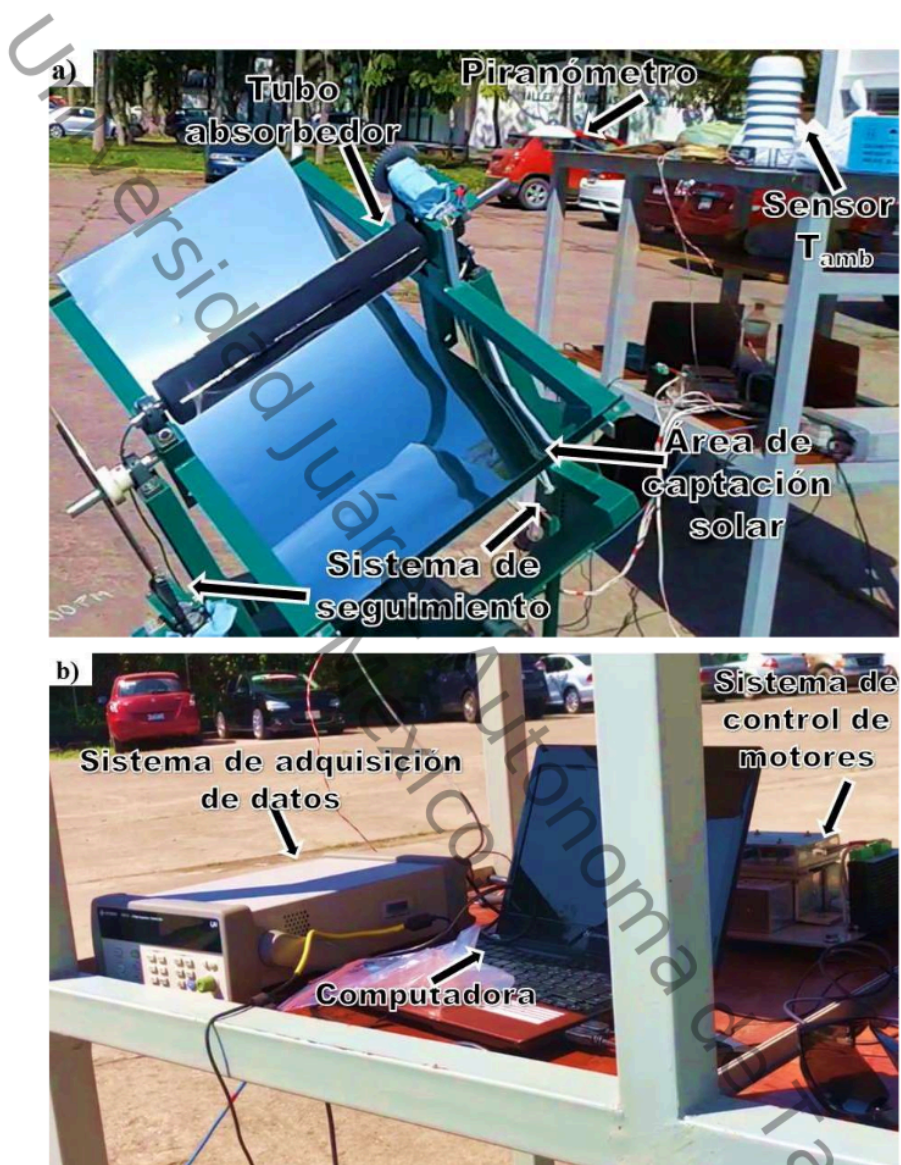


Figura 3.11. Prototipo experimental del CCP, a) CCP y b) sistema de control.

Fuente: propia.

3.3.1 Tostado de cacao

Para las pruebas de tostado de cacao se realizó un Diseño Compuesto Central (DCC) considerando el intervalo de tiempo reportado en la literatura, así como, las horas de mayor incidencia solar. La Tabla 3.4 se muestran las nueve pruebas.

Tabla 3.4 Resumen de las pruebas realizadas considerando un Diseño Compuesto Central (DCC). Fuente: propia.

Prueba	Tiempo	Horario
1	55	12:00
2	70	10:00
3	55	12:00
4	70	14:00
5	40	10:00
6	55	12:00
7	55	12:00
8	40	14:00
9	55	12:00

En el diagrama de la Figura 3.12 se presenta el proceso del tostado solar de cacao. Como se observa inicialmente se consiguen los granos de cacao secos y fermentados, se instala el tostador y el sistema de seguimiento solar, inmediatamente se ingresan los granos al tubo absorbedor para iniciar el proceso de tostado, considerando las condiciones de la Tabla 3.4. Al finalizar el proceso de tostado, se enfrían los granos, se etiquetan y se almacenan para realizar las pruebas de calidad.

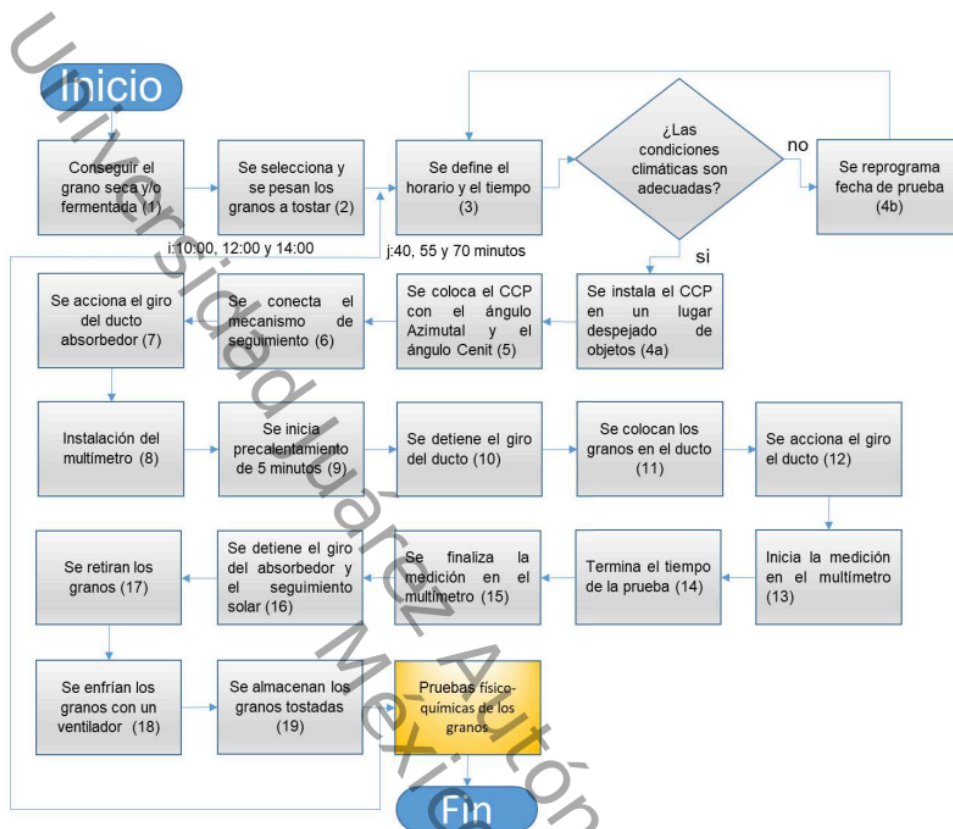


Figura 3.12. Diagrama de flujo del procedimiento de tostado solar. Fuente: propia.

3.3.2 Pruebas fisicoquímicas

Las pruebas fisicoquímicas que se realizaron fueron, contenido de humedad, contenido de fenoles totales, la acidez total y el pH. Todas las pruebas se realizaron por triplicado. En el diagrama de la Figura 3.13 se presenta el procedimiento de obtención del contenido de humedad de la muestra. Esta prueba consiste en pesar inicialmente la masa de la muestra, posteriormente se seca en la estufa, se deja enfriar y se pesa la masa final de la muestra. Este proceso se repite para el total de muestras, y el contenido de humedad se

determina con la Ecuación (2.4). En la Figura 3.14 se presenta las fotografías del proceso de determinación de contenido de humedad.

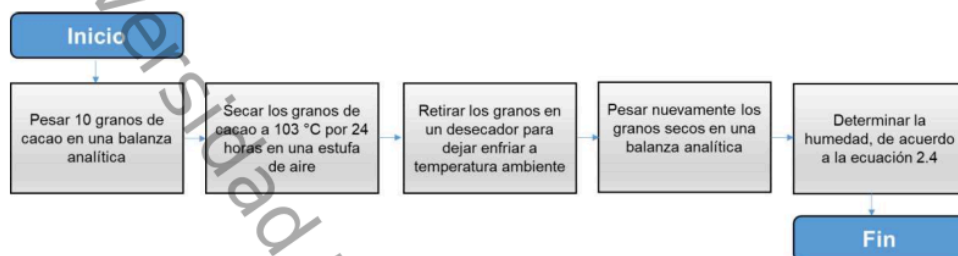


Figura 3.13. Diagrama de flujo de la prueba de humedad. Fuente: propia.



Figura 3.14 a) Selección y pesado de los granos; b) secado de la muestra y c) pesado de los granos secos. Fuente: propia.

En el diagrama de la Figura 3.15 se presenta el procedimiento general de obtención de pH. Para realizar esta prueba es necesario triturar el grano de cacao hasta obtener un polvo, el cual se diluye en agua destilada, se filtra y posteriormente se realizar la medición del pH utilizando un potenciómetro. En la Figura 3.16 se presentan las fotografías del proceso de medición de PH.

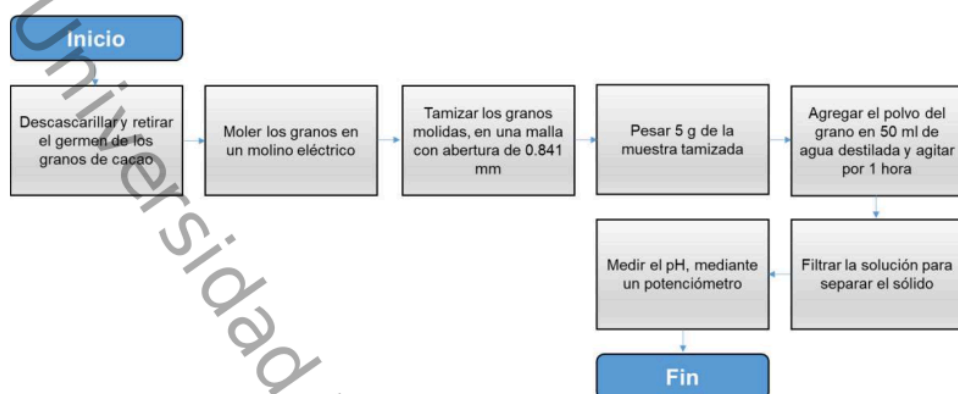


Figura 3.15. Diagrama de flujo de la prueba de pH. Fuente: propia.

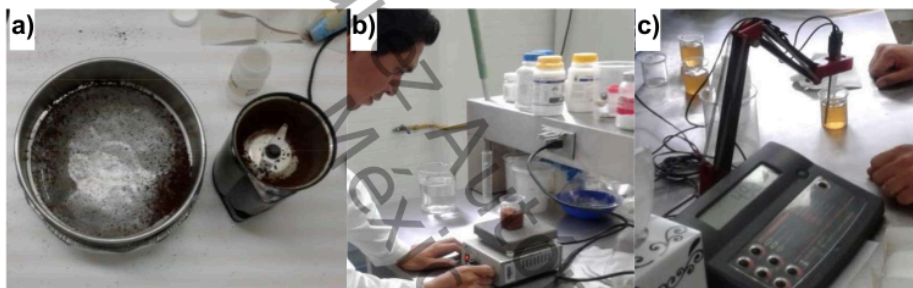


Figura 3.16 a) Trituración y tamizado de la muestra; b) mezclado del polvo y c) medición de pH. Fuente: propia.

En el diagrama de la Figura 3.17 se muestra el procedimiento de obtención de la acidez total. En esta prueba al igual que en la de pH, es necesario triturar el grano de cacao hasta obtener un polvo, el cual se diluye en agua destilada, se filtra y finalmente, se realiza un proceso de titulación con un reactivo base de NaOH hasta alcanzar un valor de pH de 8.3. La acidez total se determina con las Ecuaciones (2.5) y (2.6). En la Figura 3.18 se presentan las fotografías del proceso para determinar la acidez total.

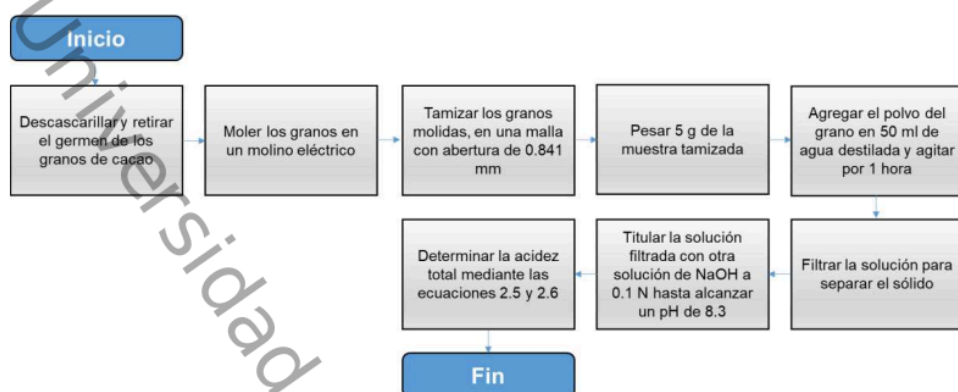


Figura 3.17. Diagrama de flujo de la prueba de la acidez total. Fuente: propia.

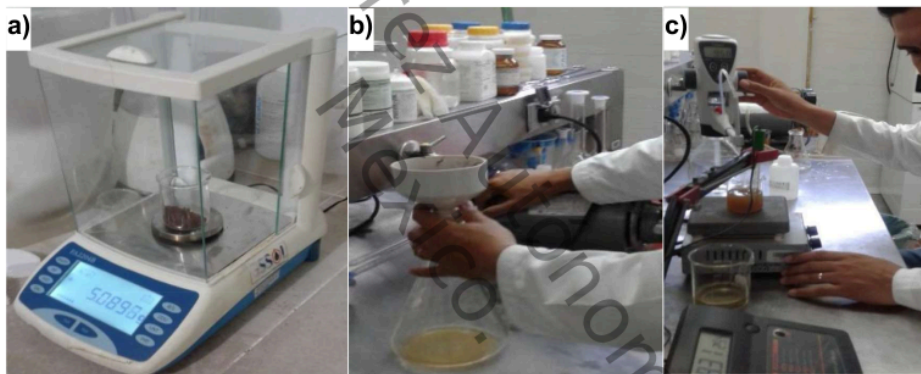


Figura 3.18 a) pesado de la muestra; b) filtrado y c) titulación de la muestra. Fuente: propia.

En el diagrama de la Figura 3.19 se muestra el procedimiento de obtención del porcentaje de grasa. Para realizar esta prueba es necesario triturar el grano de cacao hasta obtener un polvo, posteriormente ingresar la muestra pesada en el extractor Soxhlet para realizar la extracción de grasa y finalmente determinar el contenido de grasa por diferencia de peso, considerando el peso del matraz vacío y el peso del matraz con grasa de cacao.

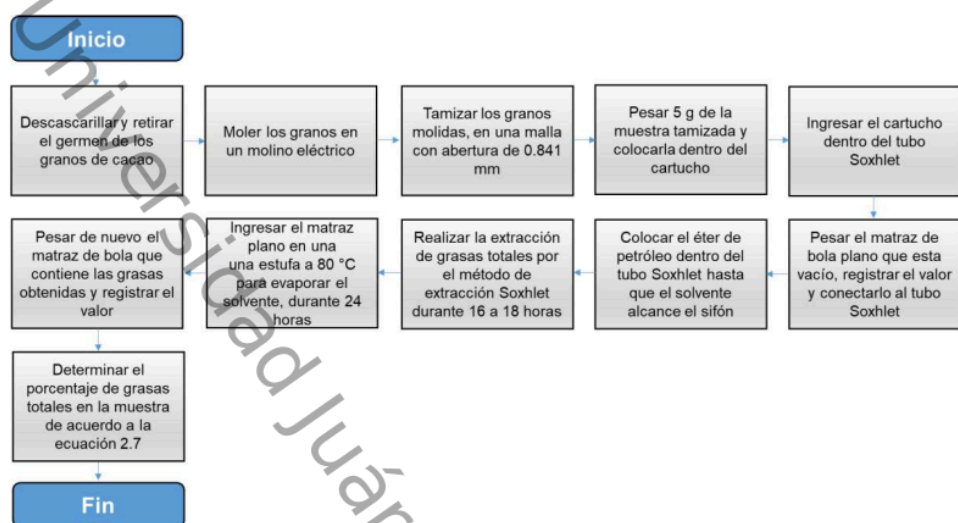


Figura 3.19. Diagrama de flujo de la prueba de grasa. Fuente: propia.

En el diagrama de la Figura 3.20 se presenta el procedimiento general de obtención de contenido de fenoles totales. Para realizar esta prueba se preparó la muestra acuerdo al método de Singleton y Rossi (1965) modificado por Othman *et al.* (2007). La prueba consiste en agregar el agente de Folin-Ciocalteu para activar los fenoles en la muestra de cacao, para posteriormente medir en un espectrofotómetro la cantidad de luz absorbida en la muestra y finalmente determinar la cantidad de fenoles por medio de las ecuaciones de la curva de calibración obtenidas a partir de un ajuste de los datos obtenidos. En la Figura 3.21 se presentan las fotografías del proceso para determinar los fenoles totales, incluyendo el proceso de desgrasado.

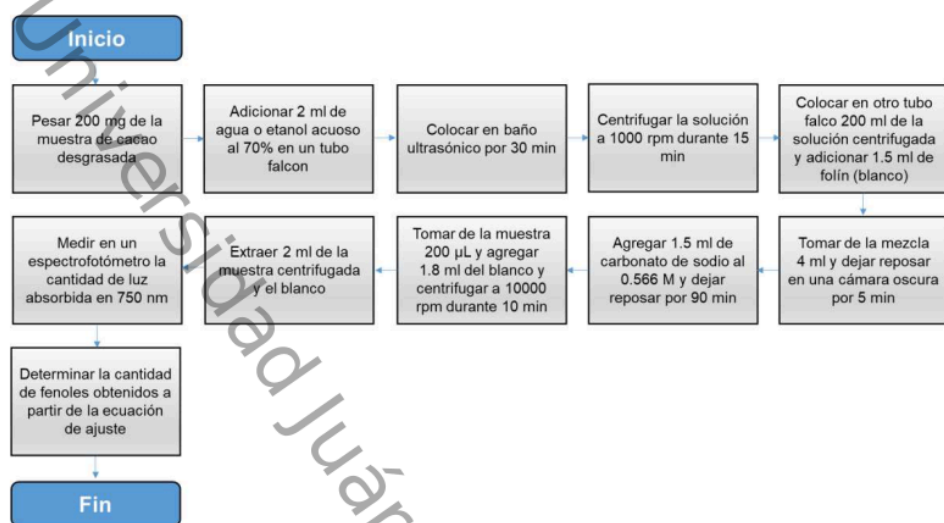


Figura 3.20. Diagrama de flujo de la prueba de fenoles totales. Fuente: propia.

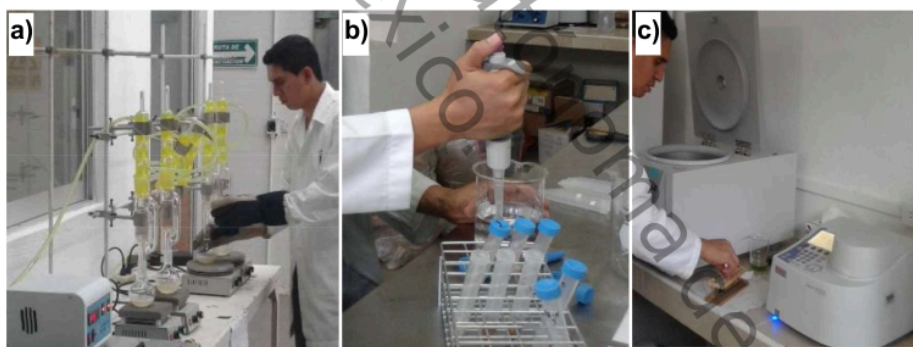


Figura 3.21 a) Desgrasado de la muestra; b) adición de agua o etanol a la muestra y c) centrifugado y medición de absorbancia. Fuente: propia.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos de los perfiles de temperatura durante el proceso de tostado de granos de cacao, así como, el comportamiento de las condiciones ambientales durante estas pruebas experimentales. También, se incluyen los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas para analizar la calidad del grano tostado, estas pruebas son de interés para determinar las características deseadas para la elaboración de chocolate.

4.1 Muestra

La muestra utilizada para las pruebas de tostado fueron granos de cacao fermentados y secados al sol, de la variedad Trinitario mexicano, provenientes del Centro Integral de Consultoría y Asesoría del Sureste de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Los granos de cacao se seleccionaron cuidadosamente por peso y tamaño dentro de una muestra de 15 kg, con el fin de tener pruebas comparables y poder monitorear la temperatura de un grano de cacao representativo de cada cámara del tubo absorbedor. Los granos seleccionados fueron de 1.1 a 1.5 g de peso individual, con dimensiones de 21 a 25 mm de largo, de 11 a 14 mm de ancho y un espesor de 6 a 9 mm. Para cada prueba experimental se utilizó 0.5 kg de granos de cacao seleccionados por peso y dimensiones. De la muestra de granos de cacao se seleccionaron tres granos, uno de cada cámara del contenedor de granos, a los cuales se les colocó un sensor de temperatura en su interior, para monitorear el comportamiento del grano durante el proceso de tostado y representar el comportamiento de la temperatura de los granos de cacao, como se muestra en la Figura 4.1. El proceso de selección de la muestra por tamaño y peso, se realizó con el fin de estandarizar el experimento, sin embargo, se espera en estudios posteriores analizar el proceso de tostado con muestras de granos de cacao, tal y como, se utilizan en los procesos comerciales.

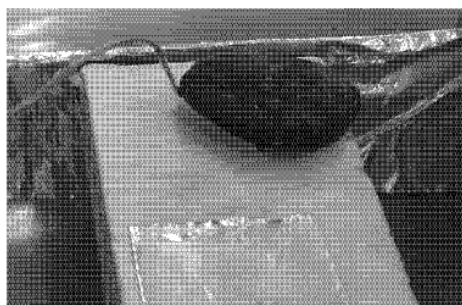


Figura 4.1 Grano de cacao instrumentado. Fuente: propia.

4.2 Pruebas de funcionalidad: sin cacao

Con el fin de conocer el potencial de calentamiento que puede alcanzar el prototipo antes de colocar los granos de cacao, se realizan pruebas preliminares para observar el comportamiento de la temperatura en el tubo absorbedor. Para ello, se realizan dos pruebas experimentales sin cacao colocando el CCP bajo incidencia normal de la irradiancia solar, ajustando el sistema de seguimiento solar para el ángulo cenit y azimutal.

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los datos generales de la Prueba 1 como son: ubicación, fecha, hora de inicio y fin, velocidad de rotación del tubo absorbedor, temperatura inicial. Mientras, que en la Tabla 4.2 se muestra un resumen de las condiciones de prueba y temperaturas alcanzadas a partir de los resultados obtenidos de imágenes termográficas. A partir de los resultados obtenidos de estas tablas se puede observar que en el precalentamiento se superaron los 90°C en el tubo absorbedor bajo condiciones cielo despejado. Se observa que en los primeros 5 minutos se alcanzó la temperatura de 97.5°C que se encuentra dentro del intervalo de temperatura reportado en la literatura para el tostado de cacao (90-170°C). En las Figuras 4.2 a la 4.5 se muestran las imágenes termográficas obtenidas durante la prueba para 5, 10, 20 y 25 minutos representativos de las condiciones bajo cielo nublado y despejado. En la tabla 4.3 se puede ver que aún bajo condiciones de cielo nublado parcialmente se pudo obtener una temperatura máxima de 91°C. También, se puede observar que las temperaturas más altas, se obtuvieron en el centro del tubo debido al área superficial de captación, mientras que los extremos del tubo además de estar expuestos a la transferencia de calor por convección no reciben la irradiancia solar de manera directa.

Tabla 4.1 Resumen de parámetros iniciales y finales de la Prueba preliminar 1.

Fuente: propia.

Condiciones de Prueba		
Irradiancia promedio	900	Wm ⁻²
Superficie del CCP	0.744	m ²
Reflectancia de los espejos	0.90	%
Temperatura ambiente promedio	37.0	°C
Emitancia del Tubo absorbedor	0.95	%
Ubicación	Estacionamiento de DAIA	
Hora inicio	10:24	
Revolución (pasos)	200	
Cantidad de cacao	Ninguna	

Tabla 4.2 Comportamiento de la temperatura de la Prueba preliminar 1. Fuente: propia.

Tiempo (min)	T _{max} del tubo absorbedor (°C)	Observación de condiciones de cielo
01	97.2	Despejado
02	97.5	Despejado
03	90.9	Nublado parcial
04	91.0	Nublado parcial
05	97.4	Despejado
10	97.5	Despejado
15	91.0	Nublado parcial
20	88.1	Nublado
25	85.9	Nublado
30	88.3	Nublado

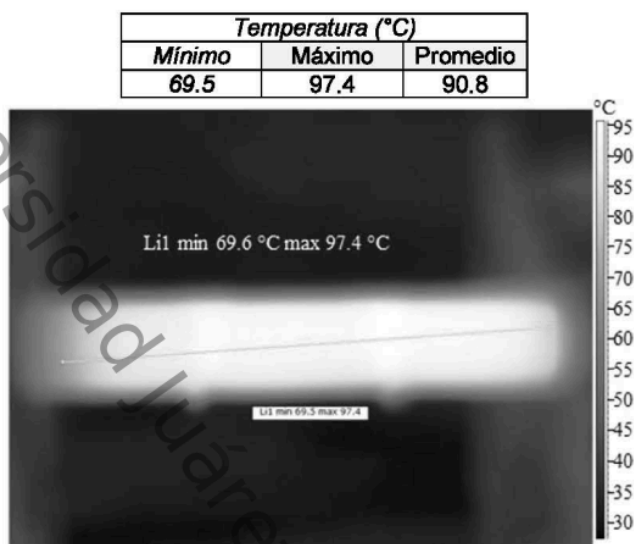


Figura 4.2 Tubo absorbedor después de 5 minutos desde el inicio. Fuente: propia.

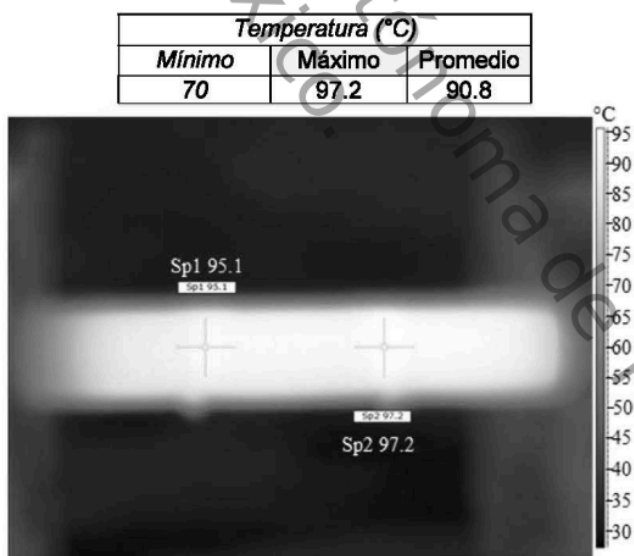


Figura 4.3 Tubo absorbedor después de 10 minutos. Fuente: propia.

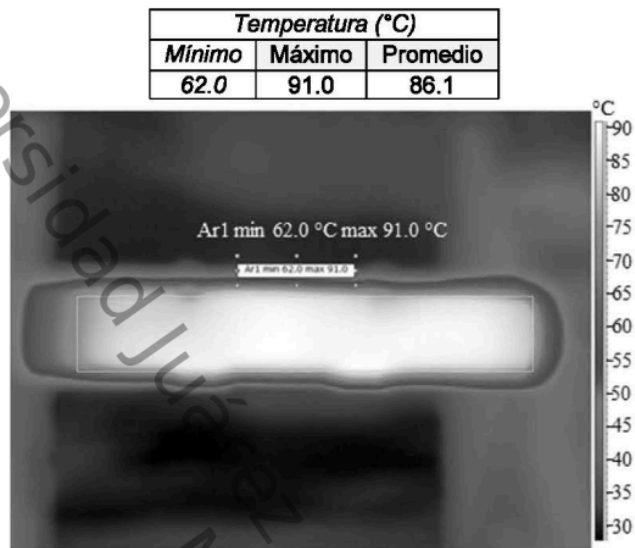


Figura 4.4 Tubo absorbedor después de 15 minutos. Fuente: propia.

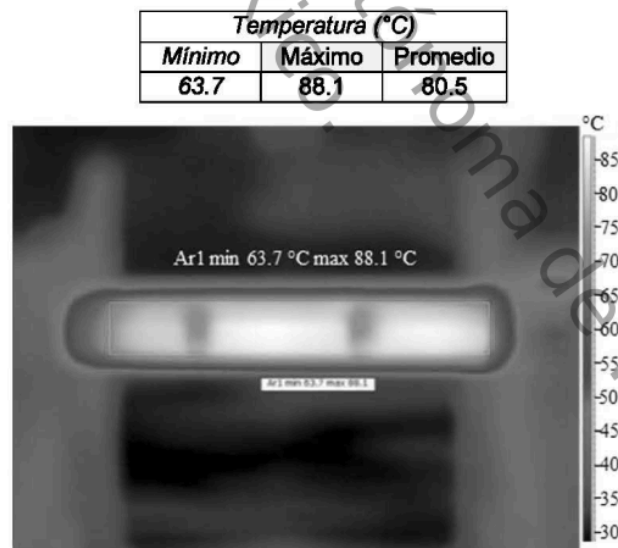
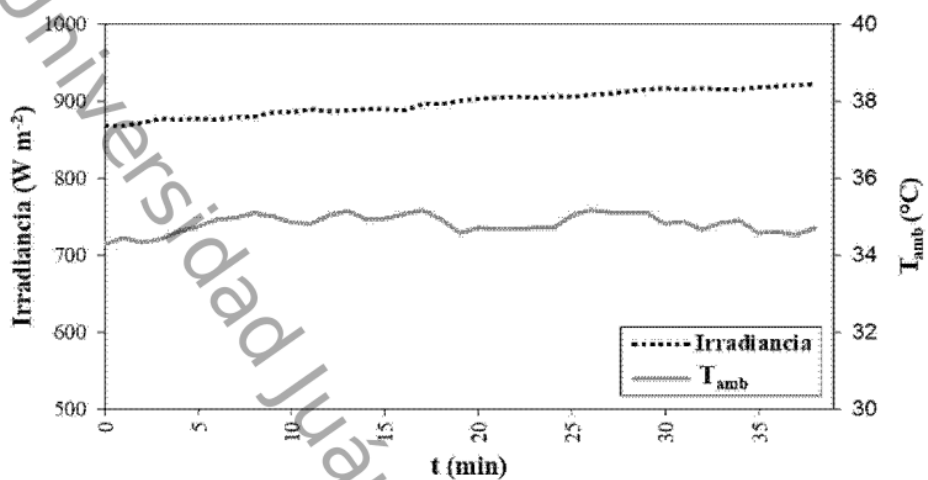


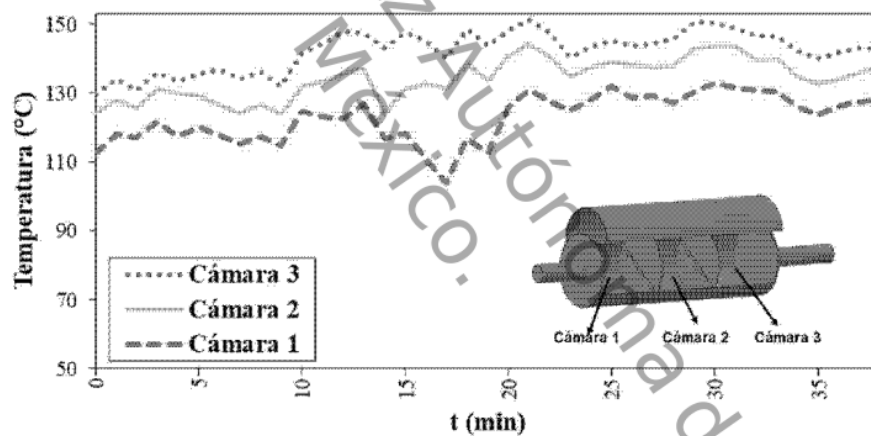
Figura 4.5 Tubo absorbedor después de 20 minutos. Fuente: propia.

La Prueba preliminar 2 se llevó a cabo bajo incidencia normal perpendicular de la radiación solar, ajustando el sistema de seguimiento solar para el ángulo cenit y azimutal. Para esta prueba se contaba con la instrumentación completa del sistema experimental, por lo que el análisis del comportamiento de la temperatura se realizó a partir de los datos medidos con los sensores de temperatura (termopares).

En la Figura 4.6 se presenta una gráfica del comportamiento de la temperatura ambiente, la irradiancia solar durante la prueba y el comportamiento de la temperatura en el interior del tubo absorbedor. Como se puede observar durante la prueba, temperatura ambiente osciló entre 34 y 36°C, mientras que la irradiancia solar se mantuvo en promedio en 900 Wm⁻². Bajo estas condiciones ambientales puede observarse que en la Cámara 3, en el interior del tubo, se alcanzó una temperatura de hasta 150°C, esta cámara se encuentra ubicada en el extremo del tubo con una inclinación del ángulo azimutal ligeramente favorecida para captar la mayor cantidad de radiación solar. Sin embargo, cabe destacar que aun cuando la Cámara 1 es la que alcanza menores temperaturas, sus valores se encuentran por arriba de la temperatura mínima reportada para el tostado de cacao (90°C). Los resultados obtenidos en la Prueba 1 y 2 indican que el sistema permite alcanzar la temperatura de 90°C requerida para llevar a cabo el tostado de granos de cacao, (90-170°C) de acuerdo Afoakwa, (2016).



(a)



(b)

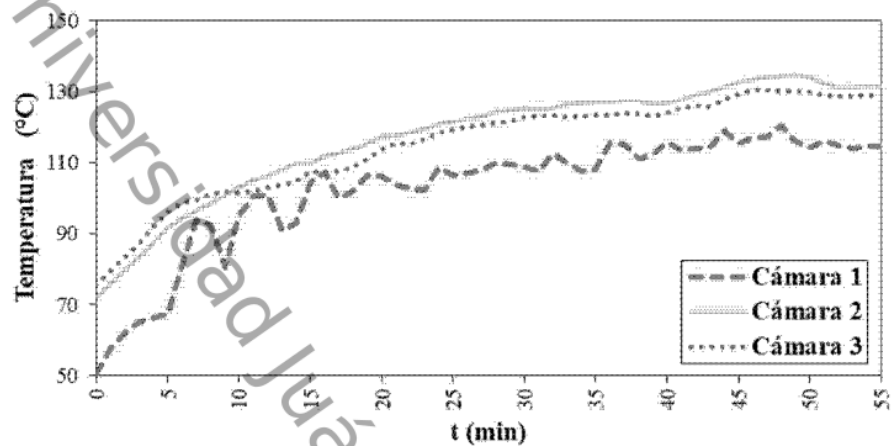
Figura 4.6 Prueba preliminar 2 sin cacao, a) Variables meteorológicas y b) Comportamiento de la temperatura del aire interior. Fuente: propia.

4.3 Pruebas experimentales de tostado con Cacao

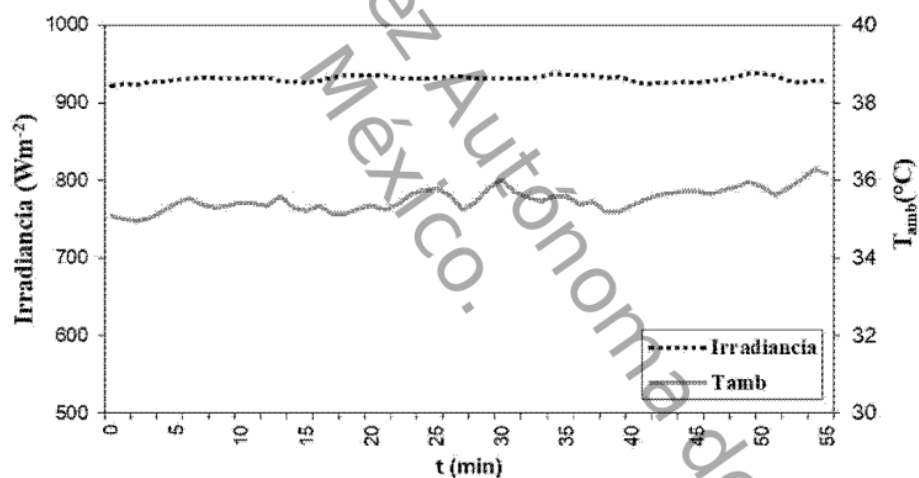
Se realizaron nueve pruebas con diferentes tiempos de tostado, como se muestra en la Tabla 3.4, las cuales están dentro del intervalo de temperatura reportados en la literatura (5-120 min). Los horarios de incidencia de radiación solar se consideraron en el intervalo de 10:00 a 14:00 hrs, que de acuerdo a los datos de radiación solar de la región, son las horas de mayor incidencia de radiación solar.

A continuación, se presentan las gráficas del comportamiento de temperatura de los granos de cacao ubicadas en cada una de las tres cámaras del tubo absorbedor, así como, las condiciones ambientales de radiación solar y temperatura ambiente. Las gráficas se presentan para las Pruebas 1, 2, 4, 5 y 8 como pruebas representativas, sin embargo, posteriormente se presentan los datos concentrados de las nueve pruebas realizadas en la Tabla 2. Estas gráficas fueron seleccionadas con el fin de contar con dos pruebas de 40 y 70 min a las 10:00 h y 14:00 h, y una prueba representativa a las 12:00 h con 55 min de duración.

En la Figura 4.7 se presentan los resultados obtenidos de la Prueba 1 de tostado a 55 min realizada a las 12:00 h, que se considera como la hora de mayor incidencia solar. Se puede observar que los granos de la cavidad ubicada en medio del tubo (Cámara 2) y en el extremo (Cámara 3) fueron las que alcanzaron las temperaturas más altas, alcanzando los 130°C, mientras la temperatura ambiente se mantuvo estable en 36°C en promedio y la irradiación solar fue de 920 Wm⁻². Se pudo observar que comparando las tres cámaras, la diferencia máxima de temperatura en los granos de cacao fue de menos de 15°C. Esta diferencia se puede atribuir a que debido a la forma del tubo y a la inclinación por el ángulo azimutal, los granos se juntan sobre el área transversal del tubo, que es la zona por la que no recibe radiación solar de forma directa. Por lo que, en la Cámara 1 los granos de cacao se tostaron con el flujo de calor recibido por conducción del resto de la superficie del tubo.



(a)



(b)

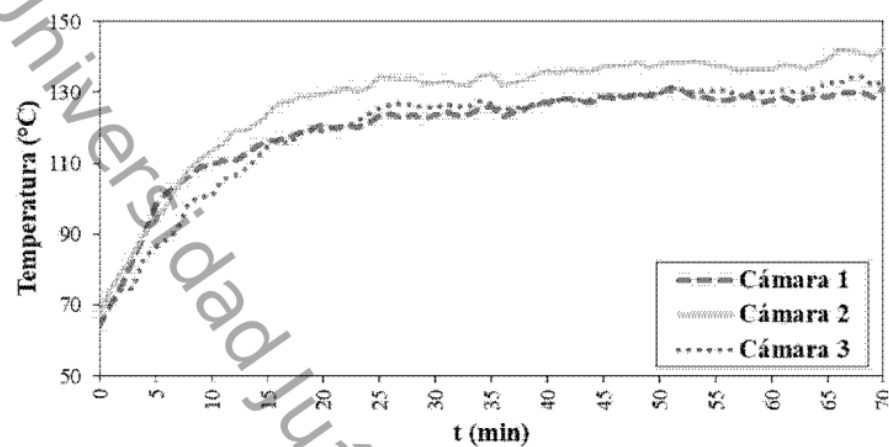
Figura 4.7 Prueba 1 de 55 min de tostado a las 12:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.

Fuente: propia.

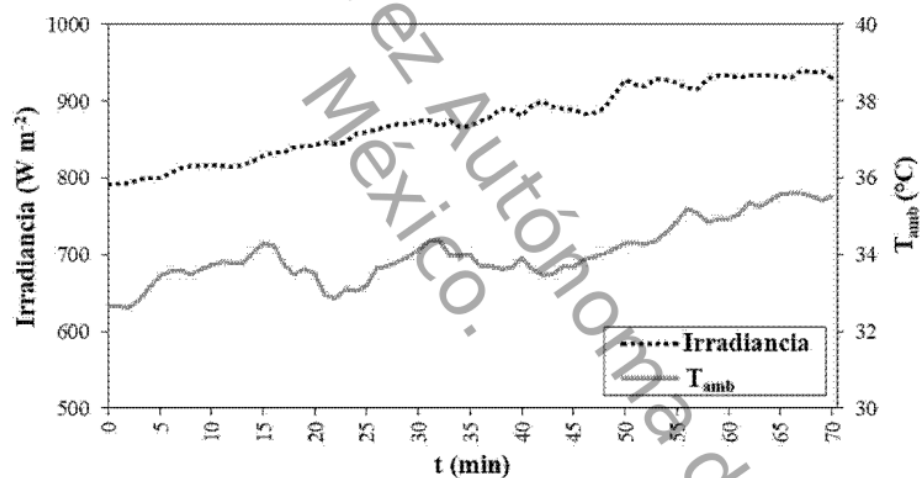
En la Figura 4.8 se presentan los resultados obtenidos de la Prueba 2, tostado a 70 min a las 10:00 h, a esta hora empieza a incrementar la irradiancia solar en el

día. Se puede observar que durante esta prueba los granos de la Cámara 1 y Cámara 3 presentaron un comportamiento similar con un máximo de 130°C, mientras que en la Cámara 2 se obtuvo una temperatura máxima de 142°C. Es importante notar que las diferencias de temperatura entre las tres cámaras fueron menores que en la Prueba 1, esto se debe a que como la prueba fue a las 10:00 h la inclinación del tubo, para una incidencia perpendicular de la irradiación solar, favoreció la distribución del flujo de calor. Aunque la temperatura alcanzada por los granos de cacao es similar que en la Prueba 1, las condiciones ambientales estuvieron en valores inferiores, en el caso de la temperatura ambiente 1°C, y en el caso de la irradiación solar estuvo en promedio en 850 W m⁻². Estos resultados son importantes debido a que el sistema puede almacenar energía y mantener las condiciones de tostado adecuadas.

En la Figura 4.9 se presentan los resultados obtenidos de la Prueba 4, tostado a 70 min a las 14:00 h, a esta hora empieza a decrecer la cantidad de radiación solar incidente como se puede observar en esta figura. Respecto al comportamiento de la temperatura ambiente, se puede observar que al igual que las pruebas anteriores se mantiene estable con un valor entre 37 y 38°C. Por su parte, la temperatura de los granos de cacao en las tres cámaras presentaron un comportamiento similar, siendo nuevamente la Cámara 1 la que alcanzo las temperaturas más bajas, sin embargo, la temperatura alcanzada de 125°C, se encuentra dentro del intervalo reportado para el tostado de cacao. En estas pruebas analizadas, es importante que en todas se inicia incrementando la temperatura de la semilla hasta alcanzar condiciones de estado permanente estabilizando el comportamiento de la temperatura,



(a)



(b)

Figura 4.8 Prueba 2 de 70 min de tostado a las 10:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.

Fuente: propia.

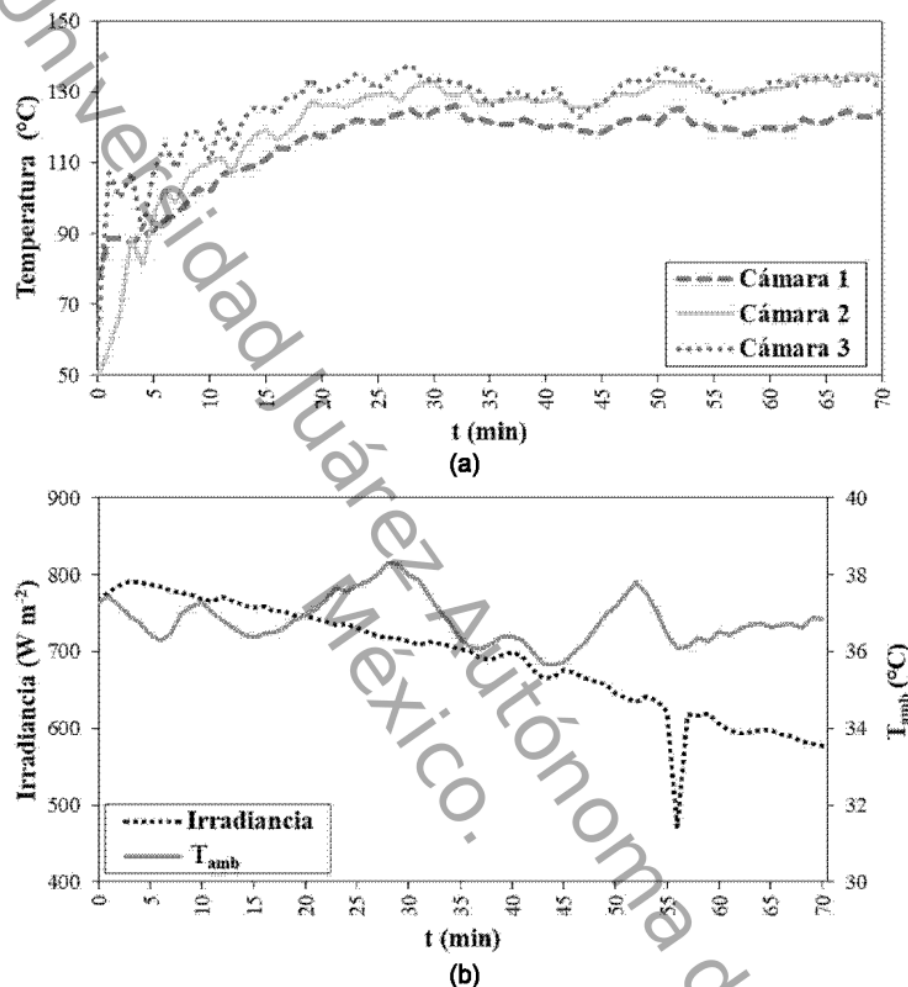


Figura 4.9 Prueba 4 de tostado de 70 min de tostado a las 14:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas. Fuente: propia.

En la Figura 4.10 se presentan los resultados obtenidos de la Prueba 5, tostado a 40 min a las 10:00 h. Como se puede observar la temperatura ambiente máxima alcanzada fue de 34°C, mientras que la irradiancia solar máxima fue de 850 W

m². Estos valores en las condiciones ambientales influyeron en las temperaturas de tostado de los granos, alcanzando una temperatura máxima de 125°C en la Cámara 3 y una temperatura máxima de 100°C en la Cámara 1. Comparando esta prueba con la Prueba 1, realizada a la misma hora, coincide con los valores de temperatura alcanzados a los 40 min. Lo anterior, nos muestra la repetitividad de las pruebas realizadas y nos indica que con mayor tiempo de residencia pueden alcanzarse temperaturas más altas. Será interesante analizar en la siguiente sección la diferencia entre los valores obtenidos en las propiedades fisicoquímicas de ambas pruebas.

En la Figura 4.11 se presentan los resultados obtenidos de la Prueba 8, tostado a 40 min a las 14:00 h. Como se puede observar la temperatura ambiente máxima alcanzada fue de 37.5°C, mientras que la irradiancia solar máxima fue de 910 W m⁻². Bajo estas condiciones climáticas se obtuvieron temperaturas del grano de cacao en el mismo intervalo que en la Prueba 4, pese a de que esta prueba fue de 70 min. La temperatura de los granos no superó los 140°C, sin embargo, coincide con lo reportado en las pruebas anteriores, siendo la Cámara 3 donde se obtienen las temperaturas más altas. Estos resultados nos indican que en el horario de las 14:00 h la temperatura de tostado del grano no incrementa significativamente cuando se incrementa el tiempo de residencia. Aunque en la prueba 2 y 4 la Cámara 2, se mantuvieron a una temperatura cercana a los 130°C por más de 40 min.

Es importante notar, que analizando estos resultados con la prueba sin cacao se coincidió con el hecho de que las temperaturas más altas fueron obtenidas en todos los casos en las Cámaras 2 y 3.

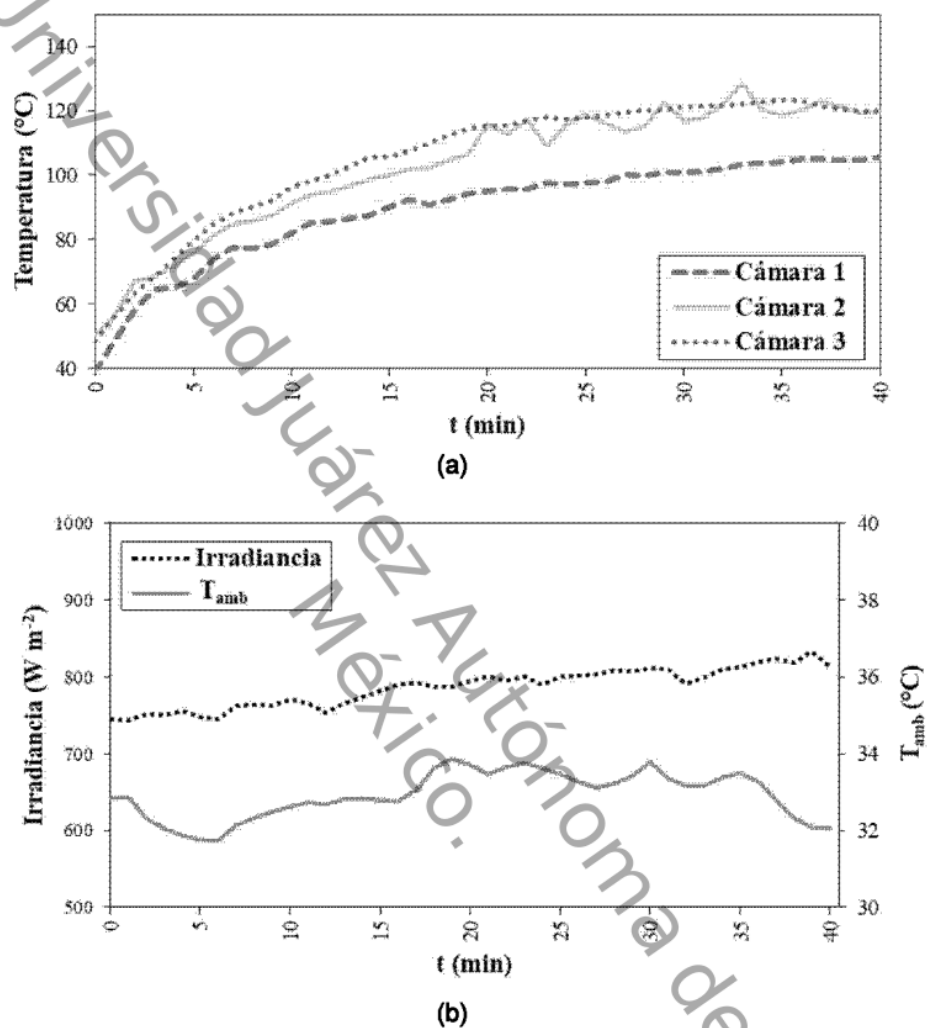


Figura 4.10 Prueba 5 de 40 min de tostado a las 10:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.

Fuente: propia.

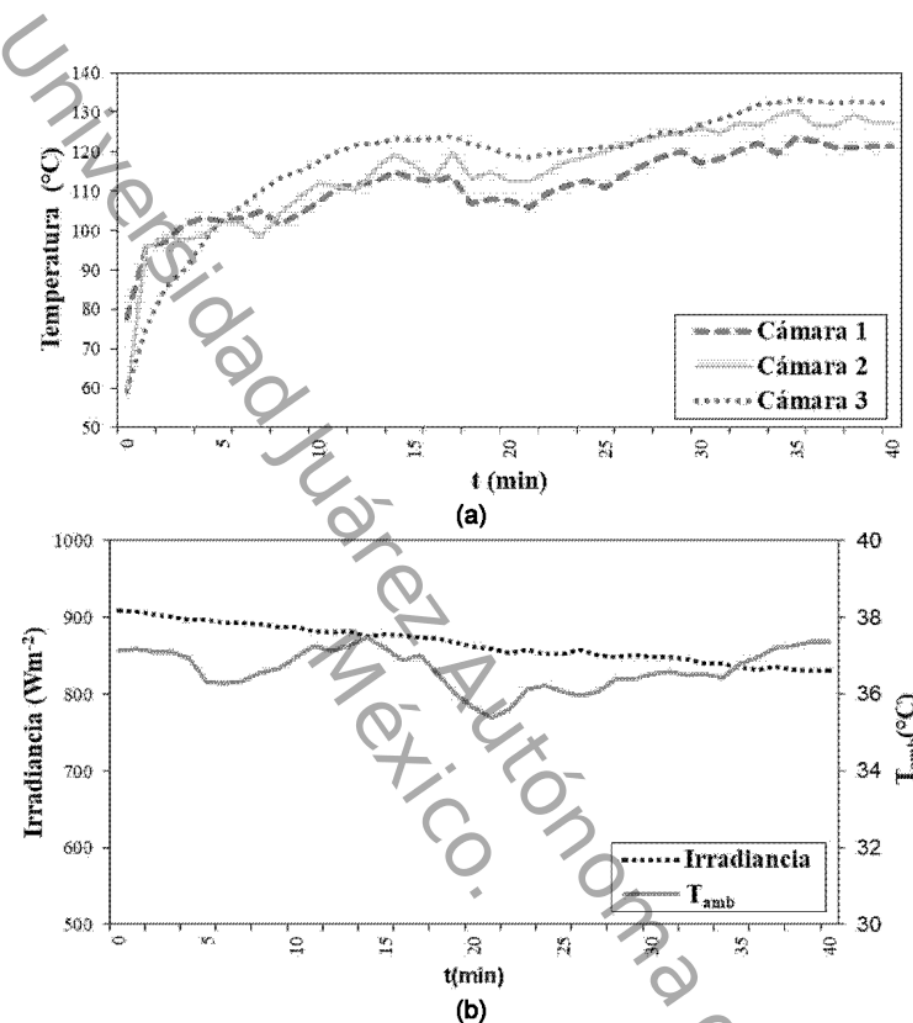


Figura 4.11 Prueba 8 de 40 min de tostado a las 14:00 h, a) Comportamiento de la temperatura en el interior del grano de cacao, y b) variables meteorológicas.

Fuente: propia.

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los valores promedio de las variables durante la prueba. En la columna uno se presenta el número de prueba, de la columna dos a la cuatro se presentan las temperaturas en la superficie del tubo para cada cámara, en las columnas de la cinco a la siete se presentan los valores

de temperatura de los granos en las tres cámaras del tubo absorbedor, en la columna ocho se presenta la temperatura ambiente y en la columna nueve se presenta el valor de la irradiancia solar. Como se puede observar el intervalo de las temperaturas promedios en las superficies de las cámaras fue de 109.8 a 134.8°C, obteniéndose para la Cámara 1 la temperatura más baja y en la Cámara 3 el valor de temperatura más alto. Las temperaturas de la superficie del tubo de la Cámara 1 (T_{PC1}) para todas las pruebas es menor en comparación de la Cámara 2 (T_{PC2}) y la Cámara 3 (T_{PC3}), esto se debe a que durante el experimento la irradiación concentrada en la Cámara 1 fue menor en comparación con la Cámara intermedia, de acuerdo con la simulación del tubo que se mostró en el Capítulo 3. Además, debido a la inclinación del tubo los granos se concentraron en la pared frontal que no está expuesta a la radiación solar, disminuyendo la temperatura de dicha cámara. El intervalo de las temperaturas en el interior del grano fue de 88.8 a 127.5°C, para la Cámara 1 (T_{C1}) y Cámara 2 (T_{C2}) respectivamente. En la Prueba 2 la temperatura de la (T_{C1}) fue similar a la (T_{C3}), como se muestra en la Figura 4.9, y esto se debe a que el proceso de tostado en los granos presento un comportamiento homogéneo durante esta prueba. La temperatura ambiente durante el conjunto de pruebas osciló entre 33.0 a 38.4°C y la irradiancia de 685.7 a 969 W m⁻². Las temperaturas promedios de la pared y del interior de los granos de la Cámara 2 y 3 fueron superiores a los 120°C aun con una irradiancia promedio de 685.7 W m⁻². Por lo que puede observarse que las temperaturas en el interior del grano están dentro del intervalo de la temperatura del tostado, el proceso de tostado se conserva aun disminuyendo la irradiancia solar y los granos de tostado presentes en la Cámara 2 y 3 presentan una mayor temperatura que permite un tostado más homogéneo.

Tabla 4.3 Resumen de las temperaturas promedio y condiciones ambientales durante las pruebas. Fuente: propia.

Prueba	T _{PC1} (°C)	T _{PC2} (°C)	T _{PC3} (°C)	T _{C1} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{C3} (°C)	T _{amb} (°C)	I (Wm ⁻²)
1	122.7	131.0	134.8	102.5	117.1	115.0	35.5	930.5
2	120.5	131.20	131.7	119.6	127.5	119.3	33.7	873.2
3	121.0	132.0	128.8	118.5	121.5	119.9	36.6	898.8
4	117.9	127.2	130.0	116.2	123.4	126.7	36.8	685.7
5	112.3	123.2	113.7	88.8	103.4	104.9	33.0	785.9
6	109.8	118.2	118.9	96.6	106.2	106.3	33.0	910.3
7	120.3	129.5	132.2	100.6	115.4	113.8	35.4	925.5
8	110.9	125.6	130.2	110.9	114.4	117.5	36.6	867.3
9	115.9	123.4	127.9	107.9	118.4	119.3	38.4	969.0

4.4 Eficiencia del CCP para el proceso de tostado

Considerando la Ecuación (2.3) se estimó la eficiencia del CCP para el proceso de tostado considerando la energía utilizada para la remoción de humedad y el proceso de tostado de los granos de cacao. La eficiencia se determinó para la Prueba 2, que de acuerdo a los resultados obtenidos en la sección anterior, fue la que presentó los mejores resultados en cuanto a comportamiento de la temperatura, por lo que, la eficiencia máxima se alcanzaría con esta prueba.

En la Tabla 4.4 se presentan los datos utilizados para el cálculo de la eficiencia. Como puede observarse la eficiencia se estimó en 7.5%, la cual puede considerarse un valor bajo si se compara con los valores reportados para los sistemas de concentración como el CCP que alcanzan hasta 66% de eficiencia. Sin embargo, debe notarse que no es posible compararla con la eficiencia de los sistemas de concentración de fluidos. Esto debido a que la eficiencia determinada en este trabajo considera solo la energía utilizada para el proceso de tostado, sin

considerar los elementos intermedios que tendrían que utilizarse para dirigir la energía hacia el proceso requerido. Además, la cantidad de cacao utilizada en este estudio fue pequeña, 0.5 kg, por lo que gran parte de la energía captada solo se utiliza para mantener el nivel de temperatura deseada.

Tabla 4.4 Datos utilizados para el cálculo de la eficiencia. Fuente: propia.

Variables	Valores	Eficiencia
m_c	0.5 kg	$\eta=7.5\%$
C_p	$1653.5 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$	
T_f	133.6°C	
T_i	33.7°C	
m_{ev}	0.04 kg	
h_{ev}	$2333300 \text{ J kg}^{-1}$	
A_a	0.744 m^2	
I	873.2 W m^{-2}	
t_f	4200 s	

4.5 Pruebas fisicoquímicas de cacao tostado

Las muestras de las nueve pruebas de tostado realizadas anteriormente, fueron cuidadosamente enfriadas a temperatura ambiente y posteriormente etiquetadas para la realización de las pruebas fisicoquímicas.

Para las pruebas fisicoquímicas, los granos de cacao tostados fueron pre-tratados eliminando de forma manual su caparazón (cubierta) y el germen. Posteriormente, se trituraron, molieron y tamizaron con un número de malla estándar 20 ($850 \mu\text{m}$). Cabe mencionar que cada una de las pruebas fisicoquímicas se realizó por triplicado. Sin embargo, para el análisis de los resultados se consideraron los valores promedio de las repeticiones.

4.5.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad es el parámetro más evaluado durante el tostado de los granos y granos debido a que es un parámetro que permite determinar las

características combinadas de sabor y aroma después de tostar (Zzaman y Yang, 2014), por lo tanto, el contenido de humedad es una variable utilizada como variable de control y optimización porque define el punto final del tostado (Hernández, 2007).

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la determinación del contenido de humedad. Se puede observar que el menor contenido de humedad, 2.13%, se obtuvo para la Cámara 2 en la prueba de tostado de 70 minutos realizada a las 10:00 hrs. Es importante señalar que de acuerdo a lo reportado en la literatura el contenido de humedad óptimo para el tostado de cacao para elaboración de chocolate se encuentra entre 1 y 2% (García *et al.*, 2017 y Aprotosoaie, *et al.* 2016). La Prueba 2 fue en general, con la que se obtuvo los valores de contenido de humedad cercanos al 2%. Mientras que las Pruebas 3, 4 y 9 alcanzaron valores cercanos al 2% en dos de sus cámaras. Los máximos valores de contenido de humedad obtenidos se presentaron para las pruebas de tostado que se llevaron a cabo durante 40 y 55 min, presentando valores con diferencias de hasta 4.34%. Por lo que, se puede observar que de acuerdo a estos resultados el tiempo óptimo de tostado podría estar por arriba de los 70 min.

4.5.2 pH y acidez total

² Durante la fermentación tradicional de cacao se forma una fracción volátil de ácidos orgánicos, principalmente ácido acético. Este ácido se elimina parcialmente durante el secado y la torrefacción. Sin embargo, la acidez total, el pH y el contenido de grasa dependen de las condiciones de temperatura y tiempo del proceso de tostado. ⁴ El efecto del pH se ha evaluado en estudios de modelos para encontrar una relación cercana con la formación de volátiles compuestos; por ejemplo, un bajo pH (≤ 5) favorece la formación de las pirazinas y un pH más elevado favorecen las metilpirazinas (García *et al.* 2017).

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la determinación del pH y la acidez total. En los estudios de tostado se ha reportado que el pH a 5.0 favorece la formación de muchos compuestos de nitrógeno como pirroles y piridinas (Cros, *et al.*, 1998) El grupo pirazinas tiene un papel importante porque representan aproximadamente el 40% del aroma del cacao (Hashim, *et al.*, 1998). Como se puede observar en la Tabla 4.6 el valor de pH para las pruebas realizadas se encuentran en promedio cercanas al pH= 5, con un valor máximo de 5.15 y un valor mínimo de 4.77. Estos resultados indican que los granos tostados se encuentran dentro del rango óptimo reportado para favorecer el aroma del cacao.

Los resultados de la acidez total encontrados se ubicaron en el rango de 4.32 - 2.80 ml de NaOH (0.1 N) g⁻¹, lo que indica un cambio significativo respecto al valor inicial de 6.85 ml de NaOH (0.1 N) g⁻¹ para alcanzar un pH de 8.3 (base). Este decremento se puede atribuir a los ácidos orgánicos volátiles, principalmente ácido acético. El rango de acidez total obtenido se encuentra cercano al reportado por García, *et al.*, (2017), que se encuentra entre el 1.81- 3.25 ml NaOH (0.1 N) g⁻¹.

Los resultados mostraron que para este estudio los valores de pH y acidez total no cambiaron significativamente entre las pruebas realizadas, aun cuando los tiempos de tostado, la irradiancia solar y el contenido de humedad variaron en su magnitud. Estos resultados pueden atribuirse a un proceso de tostado lento y controlado.

4.5.3 Fenoles totales

Los compuestos fenólicos se modifican durante el proceso de tostado y son responsables de una fracción de amargura y astringencia de granos de cacao (Jinap, *et al.*, 1998), por lo que las diferentes condiciones de tostado, el tiempo y la temperatura cambiarán sus contenidos y por lo tanto, sus atributos sensoriales. La disminución del Contenido Fenólico Total (TPC) induce sabores primarios, que

a través de productos químicos y reacciones de polimerización generan el sabor característico de chocolate (Lee, *et al.*, 2001).

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de fenoles totales con medio etanólico. El contenido de fenoles en medio etanólico ha sido reportado como el método que favorece la reacción, mostrando mayor afinidad para la extracción de compuestos fenólicos en granos de cacao, según Othman *et al.*, (2007). Como puede observarse para las pruebas de contenido de fenoles en medio etanólico solo se reportaron resultados para la Cámara 3. Lo anterior, debido al tiempo de duración de cada prueba, que además de realizarse por triplicado, considera un proceso de desgrasado de 16 horas con el método de soxhlet, considera un proceso para la obtención de la curva de calibración para determinar la cantidad de fenoles, y un procedimiento para la determinación del contenido de fenoles totales. Por lo cual, se seleccionó la Cámara 3 como la que presenta las mejores características de tostado de acuerdo a los comportamientos de temperatura obtenidos y a los resultados de las pruebas de humedad, pH y acidez total. Durante el proceso para determinar fenoles totales, se obtuvo el porcentaje de grasa de los granos de cacao, la cual se estimó en 51.5%.

Como se puede observar en los resultados de la Tabla 4.5, las Pruebas 1, 3, 7 y 9, con un tiempo de 55 min y temperaturas promedios superiores a los 120°C en la superficie del tubo, presentaron valores similares en el contenido de fenoles en un rango de 33.09 a 37.96 mg g⁻¹. A diferencia de estas pruebas, en la Prueba 6, que también se realizó en 55 minutos, se obtuvo un valor de 41.41 mg g⁻¹, esto se debió a que durante la prueba experimental disminuyó la temperatura en el tubo absorbedor (ver Tabla 4.3) debido a la disminución de la irradiación solar por condiciones nubosidades parciales. Por otra parte, en la Prueba 5 y 8 con un tiempo de 40 min se obtuvieron valores similares en contenido de fenoles, de 44.33 y 45.96 mg g⁻¹ respectivamente. En la Prueba 2 y 4 con un tiempo de 70 minutos, se obtuvo un contenido de fenoles de 37.81 y 47.99 mg g⁻¹.

respectivamente, esta diferencia de más de 10 mg/g se atribuye a los valores de irradiancia promedio de las dos pruebas, debido a que para la Prueba 2 fue de 873.2 W m^{-2} y para la Prueba 3 fue de 685.7 W m^{-2} . Los resultados obtenidos indican una promisorio actividad antioxidante en las muestras evaluadas con un alto contenido de fenoles. Los resultados revelaron que el tiempo y la temperatura de tostado fueron factores importantes en la obtención del TPC en extracto etanólico.

² Las condiciones de temperatura y tiempo aplicadas durante el proceso de tostado de los granos de cacao en un sistema de tostado solar, fueron significativas para las pruebas de contenido de fenoles totales y las pruebas de humedad, para el caso de las pruebas de pH y fenoles totales no se encontró alguna correlación entre el tiempo y las temperaturas.

Tabla 4.5 Resumen de los resultados promedio de las pruebas fisicoquímicas realizadas. Fuente: propia.

Prueba tostado	Hora (h:min)	t (min)	Contenido de Humedad (%)			pH			Acidez total NaOH (0.1 N) g ⁻¹			TPC (mg g ⁻¹)
			C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C3
1	12:00	55	3.73	3.17	3.06	5.07	4.91	4.98	4.32	3.02	3.29	33.09
2	10:00	70	2.49	2.13	2.31	4.88	4.88	4.86	3.46	3.06	3.08	37.81
3	12:00	55	2.67	2.28	3.34	4.96	4.90	5.01	3.42	3.25	3.23	34.75
4	14:00	70	2.88	2.19	2.71	4.90	4.88	4.89	3.00	2.85	3.26	47.99
5	10:00	40	4.34	3.81	3.50	4.99	4.88	4.90	2.80	3.52	3.31	44.33
6	12:00	55	4.06	3.64	3.62	5.04	4.94	4.77	3.88	3.88	3.68	41.41
7	12:00	55	3.80	3.27	3.11	5.15	4.96	5.00	3.24	3.26	3.02	37.96
8	14:00	40	4.00	3.61	3.64	5.13	4.90	4.92	3.37	3.26	3.31	45.96
9	12:00	55	3.77	2.84	2.96	5.03	4.94	4.95	3.24	3.01	3.13	35.04
Granos sin tostar			6.00			5.07			3.012			50.15

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un tostador solar con dos grados de libertad para el seguimiento solar, donde se realizaron pruebas de tostado de granos de cacao con horarios y tiempos definidos; y se evaluó la eficiencia del proceso de tostado y la calidad del grano de cacao tostado. Del análisis de los resultados obtenidos se obtuvo que:

- En las pruebas del tostador solar sin granos de cacao se alcanzó una temperatura de hasta 150°C en la Cámara 3 con una irradiancia promedio de 900 W m⁻²; y aún bajo condiciones de cielo nublado parcialmente se pudo obtener una temperatura máxima de 91°C, esta temperatura registrada se encuentra dentro del intervalo de temperatura reportado en la literatura para el tostado de cacao (90-170°C).
- En las pruebas del tostador solar con granos de cacao se obtuvo una temperatura en el interior del grano máxima de 142°C para la Prueba 2 en su Cámara 2, que permitió reducir el contenido de humedad hasta un 2.13%. Este porcentaje de humedad se alcanzó con un tiempo de 70 minutos y con una irradiancia promedio de 850 W m⁻². De la misma forma, en la Prueba 4, con el mismo tiempo de prueba, se alcanzó un contenido de humedad 2.19% para la cámara 2 con una irradiancia promedio de 685.7 W m⁻² y un tiempo de 70 minutos.
- La temperatura y el tiempo de tostado tienen un efecto significativo en la disminución del contenido de humedad. En la Prueba 2 se obtuvo la reducción máxima del valor del contenido de humedad, debido a que alcanzó la mayor temperatura con el mayor tiempo (70 min), mientras que,

la Prueba 5 fue la que presento la menor reducción en el contenido de humedad debido a que la temperatura alcanzada en el tubo (88.8°C) y al tiempo de prueba (40 min).

- En las pruebas de pH los valores obtenidos fueron cercanos al pH=5 y los valores de acidez se ubicaron en el rango de 4.32 - 2.80 ml de NaOH (0.1 N) g. Se encontró que la temperatura y el tiempo no tienen un efecto significativo sobre estas variables fisicoquímicas, esto puede atribuirse al lento incremento de la temperatura de tostado.
- La temperatura y el tiempo de tostado tienen un efecto significativo en la disminución del contenido de fenoles totales. Las pruebas realizadas al medio día presentan los mejores valores en la disminución del contenido de fenoles totales, debido a que en este horario se presentaron los valores de irradiancia más altos, 969 W m⁻² con un tiempo de prueba de 55 minutos.
- El tostador solar de cacao utilizando un concentrador cilindro parabólico alcanzo una eficiencia máxima de 7.5%, este valor se debe a que para su determinación solo se consideró la energía utilizada para la remoción de humedad y el proceso de tostado de los granos de cacao, para una masa de cacao de 0.5 kg.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el CCP sería una opción para seguir desarrollando su aplicación para el proceso de tostado de cacao, y que para alcanzar el contenido de humedad optimo se requiere incrementar el tiempo de tostado por arriba de 70 min, con el fin de obtener contenidos de humedad debajo del 2% como medida de control y optimización para definir el punto final del tostado que determinará las características combinadas de sabor y aroma del cacao. Un aspecto detectado, como oportunidad de mejora fue el tubo absorbedor, el cual podría rediseñarse para evitar la aglomeración de

granos en un punto y de esa forma mejorar la distribución de calor y como consecuencia mejorar el aprovechamiento de la energía solar captada y obtener un tostado homogéneo. El uso y posterior escalamiento de un CCP para el tostado de cacao podría reducir costos al minimizar el uso de combustibles fósiles, mediante el aprovechamiento de la energía proveniente de fuentes naturales.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- Rediseñar el tubo absorbedor para mejorar la distribución de los granos de cacao a lo largo del tubo, con el fin de evitar que los granos de cacao se concentren en las paredes frontales de las cámaras debido a la inclinación del tubo, lo cual podría mejorar la homogeneidad del tostado y reducir el tiempo de tostado.
- Establecer un procedimiento para el depósito de los granos de cacao en el tubo, reduciendo las pérdidas de calor en el proceso de precalentamiento, para que las pruebas inicien con una temperatura mayor a la reportada en esta tesis.
- Se recomienda continuar con el estudio experimental, tomando los intervalos de tiempo a partir de la estabilización de la temperatura en el interior del grano de cacao y probar su factibilidad con diferentes tamaños de cacao y para otros tipos de granos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Othman A., Ismail A., N. Abdul Ghani N., and I. Adenan. (2007). Antioxidant capacity and phenolic content of cocoa beans. *Food Chemistry*, 100. 1523–1530.
- Afoakwa, E. O. (2014). *Cocoa production and processing technology*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Afoakwa, E. O. (2016). *Chocolate science and technology*. State Avenue, Ames, Iowa 50014-8300, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Aprotosoaie, A. C., Luca, S. V., & Miron, a. A. (2016). Flavor chemistry of cocoa and cocoa. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 73-91.
- ASTM International, standard specification and temperature electromotive force (EMF) tables for standardized thermocouples, ASTM E 230-03, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2003) 1–192.
- Arrazate, C. H., Fuentes, J. M., Rojas, E. C., Méndez, R. A., López, A. M., Medina, J. F., Zaragoza, S. E. (2011). Diagnóstico del cacao en México. Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Avella, D. M., García, C. A., & Cisneros, A. M. (2008). Medición de fenoles y actividad antioxidante en malezas usadas para alimentación animal. (pp. 1-5). Santiago de Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Burger, B. (2014, Julio 21). Electricity production from solar and wind in Germany in 2014. (G. Fraunhofer Institute, Editor) Retrieved from <http://www.ise.fraunhofer.de/>
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Chemistry* (11th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Cocina Solar (2017). *Cocina con el Sol es limpio y saludable*. Visitado en 23 de junio de 2018, 11:20 pm. URL: <https://gastronomiasolar.com/ph-alimentos/>
- Cruz, J. A. (2012). *Diseño de un concentrador solar lineal tipo fresnel de baja entalpía para calor de procesos* (Tesis de maestría). Xalapa Enríquez., Ver.: Universidad Veracruzana.

- Cruz, T. M., & montes, I. E. (2007, Diciembre). Diseño, construcción, control y automatización de un concentrador solar cilindrico parabólico. (Tesis de licenciatura) Ciudad de Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Cros E. (1998). Torrefaction. En Cacao et chocolat. production, utilisation, caracteristiques, in Collection sciences techniques agroalimentaires, (Technique & Documentation Lavoisier), France.
- Escalante, F. (2015). Desarrollo de un prototipo de tostador de granos de cacao de 6 kg/hora que funcione con energía solar concentrada (tesis de licenciatura). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Farah, D., Zaibunnisa, A., & Misnawi. (2012). Optimization of cocoa beans roasting process using Response Surface Methodology based on concentration of pyrazine and acrylamide. International Food Research Journal, 19, 1355-1359.
- García-Alamilla, P., Lagunes-Gálvez, L. M., Barajas-Fernández, J., & García-Alamilla, R. (2017). Physicochemical Changes of Cocoa Beans during Roasting Process. *Journal of Food Quality*, 2017, 1-11.
- García, O. M. (2017). Concentrador cilindrico parabólico para el tostado del cacao (Tesis de licenciatura). Cunduacán, Tabasco: Univerdidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Gomez, R. (2013). Seguidor solar para un concentrador cilíndrico parabólico(Tesis de licenciatura). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hadzicha, M., Veynandt, F., Delcolb, J., Hadzichb, L. M., Pérezb, J. P., & Vergarab, S. (2014). Design of a Solar Coffee Roaster for Rural Areas. *Energy Procedia*, 57, 3215-3224.
- Hernández J. A., Heyd B., Irls C., Valdovinos B, and Trystram G.. (2017). Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting. *Journal of Food Engineering*, 78, 1141–1148.
- Janek, N., Niewianda, A., Wöstemeyer, J., & Voigt, J. (2016). The cleavage specificity of the aspartic protease of cocoa beans involved in the generation of the cocoa-specific aroma precursors. *Food Chemistry*, 211, 706-713.

- Jara, W. (2008). introduccion a las energías renovables no convencionales. Empresa Nacional de Electricidad S.A.
- Jebasingh, V. &. (2016). A review of solar parabolic trough collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1085–1091.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 231–295.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: processes an systems*. U.S.A.: Academic Press.
- Kearney, D., & Price, H. (1992). Solar thermal plants-LUZ concept. (pp. 582-588). UK: *Proceedings of the Second Renewable Energy Congress*,.
- Kofi, T. S., and Salifu, S. (2017). Potential production of biodiesel from green microalgae. *BIOFUELS*, 759-7269.
- Kreith, F., & Kreider, J. (1978). *Principles of solar engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Lamba, D. K. (2012). A Review on Parabolic Trought Type Solar Collectors: Innovation, Application Thermal Energy Storage. *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering*, (págs. 90-99). TITS Bhiwani, Haryana: YMCA University of Science & Technology.
- Liu, J. T., Li, M., Yu, Q. F., & Ling, D. L. (2014). A Novel Parabolic Trough Concentrating Solar Heating for Cut Tobacco Drying System. *International Journal of Photoenergy*, 2014, 1-10.
- Mao, Q., Wu, H., & Zhang, L. (2015). Study on Concentrating Characteristics of a Solar Parabolic Dish Concentrator within High Radiation Flux. *International Journal of Photoenergy*, 2015, 1-8.
- P.Hashi¹⁰, J. Selamat, S. K. S.Muhammad, and A. Ali. (1998).Changes in free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentration during cocoa fermentation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78, 535–542.
- Patoda, L., & Parashar, V. (2013). Solar energy for domestic and small industries with help ofparabolic trough solar concentrator. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2, 2828-2832.
- Romer²¹ O., Romero, S., & Wood, D. (2011). *Energías Renovables:Impulso político y tecnológico para un México sustentable*. Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

- Romero, S., Romero, O., & Wood, D. (2012). Energías renovables: impulso político y tecnológico para un México sustentable. *Foreign Affairs Latinoamérica*, 12, 153.
- Sandeep, H., & Arunachala, U. (2017). Solar parabolic trough collectors: A review on heat transfer augmentation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1218-1231.
- Jinap S., Wan Rosli W. I., Russly A. R., and Nordin L. M.. (1998). Effect of roasting time and temperature on volatile component profiles during nib roasting of cocoa beans (*Theobroma cacao*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77, 441–448.
- Lee S., Yoo S., Lee M., Kwon I., and Pyun Y.. (2001). Optimization of nibs roasting in cocoa bean processing with lotte-better taste and color process. *Food Science and Biotechnology*, 10, 286–293.
- Ortiz, N. M. (2016). Diseño de un concentrador de canal parabólico mediante la minimización de generación de entropía (Tesis de maestría). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Solar, C. (2010). [www.cocinasolarmexico.com.mx](http://www.cocinasolarmexico.com.mx/crbst_7_m.html). Obtenido de http://www.cocinasolarmexico.com.mx/crbst_7_m.html
- Tzuc, O. M., Quintal, I. P., & Bassam, A. (2016). Desarrollo de interfaz computacional para el dimensionamiento y estimación de la eficiencia óptica y térmica de concentradores solares de canal parabólico. (pp. 1-8). Yucatán: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Ullah, F., Khattak, M. K., Khan, M., Hassan, L., & Hasrat, K. (2016). Impact of the dehydration process on guava by using of the parabolic trough solar concentrator. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 26, 92-97.
- Venegas-Reyes, E., Jaramillo, O. A., Castrejón-García, R., Aguilar, J. O., & Sosa-Montemayor, F. (2012). Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation. *J. Renewable Sustainable Energy*, 4, 1-18.
- Veynandt, F., Panduro, J. P., Navarro, J. E., & Hadzich, M. (2016). Cacao roasting in rural areas of Peru using concentrated solar. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 1, 1-5.
- Grasse W. (1995). Solar PACES Annual Report. Alemania: DLR.

- Zzaman W. and Yang T. A., (2014) Moisture, color and texture changes in cocoa beans during superheated steam roasting. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 1364–1370
- Westcott, C. C. (1978). pH Measurements. London: Academic Press
- Zapata Bustamante, S., Tamayo Tenorio, A., & Rojano, B. A. (2015). Efecto del Tostado Sobre los Metabolitos Secundarios y la Actividad Antioxidante de Clones de Cacao Colombiano. *Universidad Nac. Revista Facultad Nacional de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia.*, 68, 7497-7507.
- Żyżelewicz, D., Budryn, G., Krysiak, W., Oracz, J., Nebesny, E., & Bojczuk, M. (2013). Influence of roasting conditions on fatty acid composition and oxidative changes of cocoa butter extracted from cocoa bean of Forastero variety cultivated in Togo. *Food Research International*, 63, 328-343.
- Żyżelewicz, D., Krysiak, W., Budryn, G., Oracz, J., & Nebesny, E. (2014). Tocopherols in cocoa butter obtained from cocoa bean roasted in different forms and under various process parameters. *Food Research International*, 63, 390-399.

Anexo A

Artículo de divulgación

P



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura

DIRECCIÓN

El que suscribe la presente, Dr. Candelario Bolaina Torres, Director de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, hace constar que:

El trabajo:

**"SIMULACIÓN DEL DUCTO ABSORBEDOR DE UN CONCENTRADOR CANAL
PARABÓLICO UTILIZADO PARA EL TOSTADO DE CACAO"**

Autor(es):

Est. Pablo Rene Torres Hernández

Est. Oscar May García

fue aceptado para su publicación en la revista "Las Perspectivas Científicas desde la Ingeniería y la Arquitectura", con ISBN, en trámite, editado por la Dirección de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica con fecha Diciembre de 2017.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan, en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los trece días del mes de noviembre del año dos mil diecisiete.

Dr. Candelario Bolaina Torres
Director de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIRECCIÓN PARA LA PUBLICACIÓN

Cop. Archivo.

Consortio de
Universidades
Mexicanas

Carratera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Km. 1 Col. La Esmeralda, C.P. 86690
Cunduacán, Tabasco.
Tel. 3-SB-15-Q ext. 6752
direccion@uajtat.mx

SIMULACIÓN DEL DUCTO ABSORBEDOR DE UN CONCENTRADOR CANAL PARABÓLICO UTILIZADO PARA EL TOSTADO DE CACAO

Est. Pablo Rene Torres Hernández^{1*}

Est. Oscar May García¹

I. RESUMEN

En este trabajo se realiza la simulación del ducto absorbedor de un Concentrador Solar Canal Parabólico (CSCP) para tostado de cacao. La simulación se realizó utilizando una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) sobre un diseño de ducto propuesto, donde se analiza el comportamiento de la transferencia de calor y la velocidad del aire en el interior del ducto con el fin de determinar la factibilidad del diseño propuesto. Las condiciones importantes que se tomaron en este diseño fueron: el movimiento rotatorio de 2 rad/s, con cuchillas internas y la temperatura uniforme de 160°C en la parte inferior del ducto. Los resultados obtenidos de la simulación mostraron que la distribución de temperatura no fue uniforme, lo que podría afectar en la homogeneidad del tostado. Estos resultados sugieren que es necesario realizar adecuaciones en el diseño del ducto para obtener una distribución homogénea de la temperatura y como consecuencia un tostado más uniforme.

II. INTRODUCCIÓN

La energía solar tiene un gran potencial económico, debido a los recursos inagotables a escala humana, en la que puede utilizarse para la generación de calor, la iluminación de viviendas y para aplicaciones de procesos industriales. Varios países en vías de desarrollo como India, Marruecos, Egipto y México, que cuenta con altos niveles de radiación solar se están moviendo para generar energía eléctrica a través de la concentración solar. Un colector solar, es un dispositivo, que tiene la capacidad de recibir la radiación solar y convertirla en energía térmica. Hay muchos tipos de colectores solares, dentro de los cuales destaca los concentradores de canal parabólico que alcanzan temperaturas de hasta 350 a 400°C. Los CSCP se han estudiado y desarrollado ampliamente tanto analítica y experimentalmente, además de contar con eficiencias térmicas relativamente altas. Dentro de las aplicaciones de los CSCP se encuentran: a) Sistemas de calentamiento de aire para la industria textil, de alimentos, agricultura y calefacción de edificios; b) En los procesos de desalinización; c) en sistemas de refrigeración; d) para calor de procesos industriales como

¹ División Académica de Ingeniería y Arquitectura, DAIA.

* pabllorene120@gmail.com

el secado, la esterilización, la cocción, la limpieza y la purificación, etc, y e) Plantas para la generación de energía eléctrica [1].

Uno de estos procesos productivos dentro de la industria alimentaria donde se puede aplicar el uso de CSCP es en el tostado de las semillas de cacao para la elaboración de chocolate. El cacao es uno de los productos más apreciados en el mercado internacional debido a que sus derivados tienen gran demanda y, por lo tanto, alto valor comercial. México es el doceavo productor de cacao y sus estados con mayor producción son, Tabasco y Chiapas [2]. El proceso de transformación de la semilla de cacao se lleva a cabo de manera tradicional mediante la quema de combustibles fósiles produciendo la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. El uso del CSCP para el tostado de cacao es una alternativa viable, dado que la temperatura de tostado está dentro del intervalo alcanzado del CSCP, la eficiencia es relativamente alta, con estructuras ligeras y de uso fácil para realizar la actividad del tostado.

En este reporte se realizará el análisis térmico de tubo absorbedor para la aplicación del tostado de cacao. El estudio del desarrollo térmico del absorbedor se ha abordado mediante diferentes metodologías: i) Estudios totalmente experimentales [3-5], ii) Estudios que se basan en aproximaciones teóricas [6-7] y iii) estudios que se basan en la simulación y métodos numéricos [8]. Para este caso se analizará el comportamiento del flujo de aire y temperatura en el tubo absorbedor basado en la simulación, empleando Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD por sus siglas en inglés); el software Fluent permite el análisis de sistemas y resuelve las ecuaciones gobernantes de continuidad, momento y energía permitiendo visualizar los perfiles de velocidad y temperatura del fluido.

III. OBJETIVOS Y METAS

Simular el comportamiento del flujo de aire y temperatura en el interior de un ducto contenedor de granos de cacao, para verificar la factibilidad del diseño propuesto para el tostado de cacao.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Modelo de estudio

El diseño propuesto, en 3D, del contenedor de granos de cacao se muestra en la **Figura 1**. El material del ducto considerado, fue lámina de acero inoxidable grado 304, este material es adecuado para la industria alimentaria. El diámetro del ducto fue de 10 cm, 60 cm de

largo y un espesor de 2 mm. Este ducto está conformado de 4 cuchillas rectas, ubicadas en cada 90° del ducto, compuesta de acero inoxidable 304.

Para realizar el estudio de CFD, se utilizaron los softwares: Gambit y Fluent. En Gambit es un preprocesador que permite dibujar y discretizar (mallado) el modelo de estudio, así como, asignar las condiciones de frontera. El Fluent es el solucionador que a partir del modelo discretizado resuelve las ecuaciones gobernantes de continuidad, momento y energía permitiendo visualizar los perfiles de velocidad y temperatura del fluido.

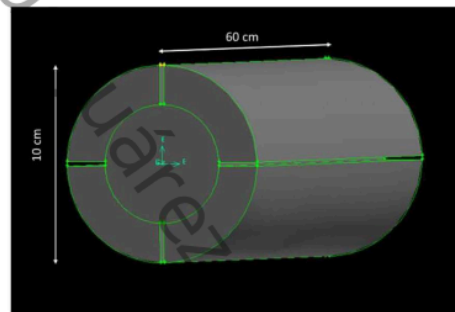


Figura 1. Diseño del ducto en Gambit.

4.2 Discretización del modelo

Para la discretización del modelo de la **Figura 1** se consideró como longitud la mitad del ducto debido a la uniformidad a lo largo del mismo, especificando la cara final como simetría. Posteriormente, esta condición de frontera mostrará la dinámica de flujo y temperatura dentro del interior del ducto. En la **Figura 2** se muestra la discretización o mallado que se realizó con este mismo software. El mallado tiene 322, 223 nodos con una relación de aspecto (altura/longitud) de hasta 4. Después, se asignaron las condiciones de frontera en el exterior del ducto: las aletas se nombraron como pared y el interior del ducto se consideró como fluido, en este caso es aire. Por último, el dibujo mallado se exporta en formato que pueda leer el Fluent, *.mesh.

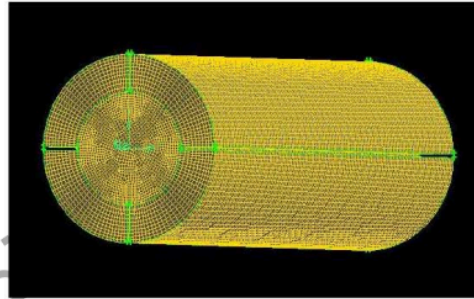


Figura 2. Discretización del ducto en Gambit.

4.3 Simulación

Para el análisis en Fluent se escaló el dibujo a dimensiones reales para luego seleccionar los modelos a utilizar, en este caso se selecciona la ecuación de energía y la condición de flujo laminar. Posteriormente, se colocaron los valores de operación y las condiciones de frontera.

Las propiedades del acero inoxidable para este estudio fueron las siguientes: una densidad de $\rho=8030 \text{ kg/m}^3$, $C_p=502.48 \text{ J/kgK}$ y $\lambda=16.27 \text{ W/mK}$. El ducto se analizó como un sistema cerrado y con movimiento rotacional de 2 rad/s , este movimiento permite aumentar la homogeneidad del tostado de la semilla. Además, se consideró que la irradiancia que se concentra en la parte inferior del ducto permite obtener una temperatura de 160°C , de manera uniforme en toda la parte inferior. Esta temperatura está dentro del intervalo para realizar el tostado de cacao, el cual es de 110 a 1160°C [9]. La temperatura a la que se encuentran las demás fronteras del ducto fueron consideradas a 30°C .

Las ecuaciones que se desarrollan en cada nodo con el software en Fluent son las siguientes:

- 1) Las ecuaciones de Navier-Stokes unidimensional,

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \partial \rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \rho g \delta_{i3} \quad (1)$$

Donde: P es la presión; μ es la viscosidad dinámica del aire; g es la gravedad; ρ es la densidad y δ_{ij} es el delta de Kronecker.

- 2) La ecuación de continuidad unidimensional:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Donde: u_i es la velocidad en la dirección i .

3) La ecuación de estado:

$$P = \rho R_u T \quad (3)$$

Donde: T es la temperatura de aire y R_u es la constante del gas.

4) Ecuación de conservación de la energía:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -P \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (4)$$

Donde: u es la velocidad, λ es la conductividad térmica y E es la energía.

Posteriormente, una vez que se han fijado las propiedades, las condiciones de frontera y se han seleccionado las ecuaciones a resolver, se inicia la solución del modelo asignando un número de interacciones y un valor del residual para la solución del sistema de ecuaciones.

V. RESULTADOS

Para la solución se propusieron 10000 iteraciones con reportes cada 10 iteraciones, las iteraciones se detienen hasta que las ecuaciones convergen, es decir, cuando se encuentra la solución. Para la solución del problema se introducen los criterios de baja relajación y se define el criterio de convergencia, que para este caso fue de 1×10^{-2} . Este criterio significa que si la solución en el tiempo actual comparada con la solución en el tiempo anterior, tienen una diferencia igual o menor a 1×10^{-2} , entonces se detiene la simulación y se dice que converge.

En la **Figura 3** se observa el comportamiento de los residuales hasta su convergencia. Se puede observar que las ecuaciones convergieron a las 650 iteraciones.

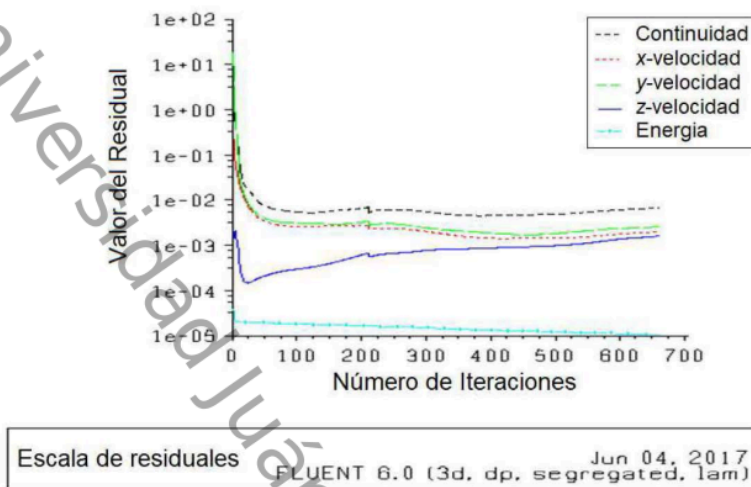


Figura 3. Valores de los residuales de las ecuaciones gobernantes.

En la **Figura 4** se puede observar el perfil de temperatura obtenido en el ducto. La temperatura alcanzada en el ducto osciló entre 124 - 160°C (397.15 - 433.15 K), donde la temperatura más alta se encontró en la mitad del ducto en la parte inferior. La distribución de la temperatura en el interior del ducto no fue uniforme debido al movimiento rotatorio del ducto y las propiedades del aire. Por otra parte, en la **Figura 5** se presenta el comportamiento de la velocidad del aire en el interior del ducto, obteniendo una distribución con velocidades relativamente bajas, siendo la máxima velocidad obtenida de 0.123 m/s.

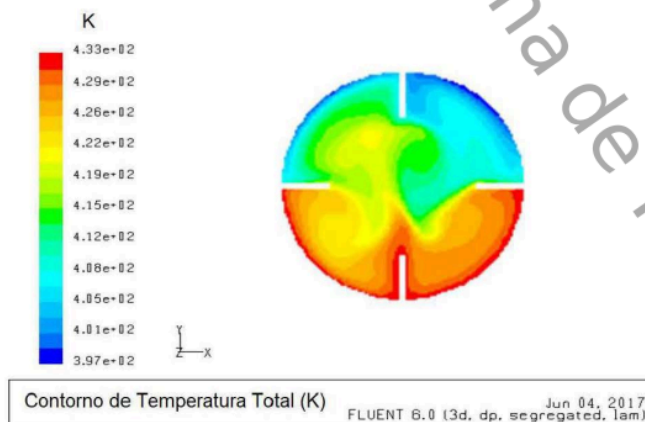


Figura 4. Distribución de la temperatura del aire en el ducto.

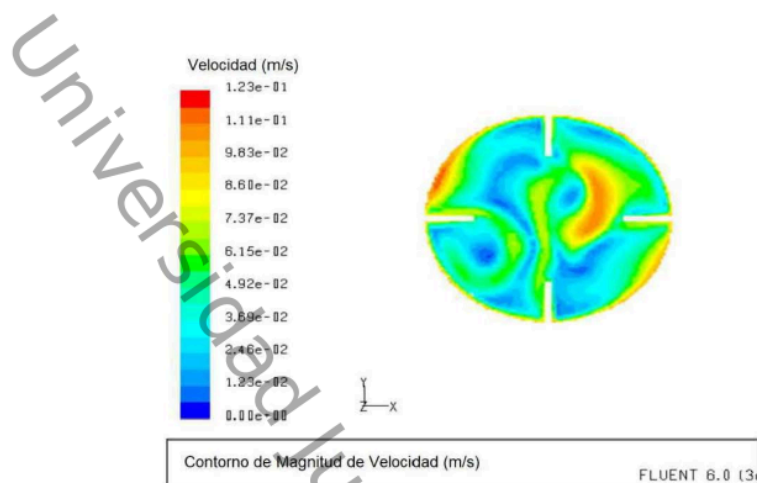


Figura 5. Distribución de la velocidad del aire en el interior del ducto.

VI. CONCLUSIONES

La temperatura alcanzada en el ducto se encontró en el intervalo de 124 a 160°C (397.15 - 433.15 K), este intervalo se encuentra en el intervalo de temperatura que registra la literatura para el tostado de cacao. Por lo que, los niveles de temperatura son adecuados para este proceso. Sin embargo, se pudo observar que la distribución de temperatura más caliente se ubica en una zona específica debido al movimiento rotatorio del ducto, por lo que podría afectar en la homogeneidad del tostado. Estos resultados sugieren que el diseño obtenido es factible de ser construido y que sería conveniente analizar el comportamiento de la temperatura obtenida experimentalmente con la obtenida en este trabajo para evaluar la metodología de diseño utilizada para lograr un tostado de cacao uniforme.

VII. REFERENCIAS

- [1] Jebasingh, V., & G.M.JoselinHerbert, 2016, A review of solar parabolic trough collector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54: 1085–1091.
- [2] INEGI, 2012, Instituto Nacional de Estadística y geografía.
- [3] Tagle, P. D., Agraz, A., & Rivera, C. I., 2016, Study of applications of parabolic trough solar collector technology in Mexican industry, *Energy Procedia*, 91: 661 – 667
- [4] Ullah, F., Khattak, M. K., Khan, M., Hassan, L., & Hasrat, K., 2016, Impact of the dehydration process on guava by using of the parabolic trough solar concentrator, *Pakistan Journal of Food Sciences*, 26 (2): 92-97.

- [5] Liu, J. T., Li, M., Yu, Q. F., & Ling, D. L., 2014, A Novel Parabolic Trough Concentrating Solar Heating for Cut Tobacco Drying System, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy*, 2014: 1-10.
- [6] Ze-Dong Cheng, Ya-LingHe, YuQiu, 2015, A detailed nonuniform thermal model of a parabolic trough solar receiver with two halves and two inactive ends, *Renew Energy*, 74: 139-147.
- [7] Oliveira Siqueira A. M., Neves Gomes P.E., Torrezani L., Oliveira Lucas E., Da Cruz Pereira G. L., 2014, Heat transfer analysis and modeling a parabolic trough solar collector, *Energy procedia*, 57: 401-410.
- [8] Zhiyong Wu, Wang Zhifeng, 2014, Three dimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver, *Applied Energy*, 113: 902-911.
- [9] Farah, D., Zaibunnisa, A., & Misnawi, A., 2012, Optimization of cocoa beans roasting process using Response Surface Methodology based on concentration of pyrazine and acrylamide, *International Food Research Journal*, 19 (4): 1355-1359.

Anexo B

Actividades académicas

- 1) Estancia en la Plataforma Solar de Almería, España.
- 2) Ponencia Nacional.
- 3) Cursos de actualización continua.

1) Estancia en la Plataforma de Almería, España.

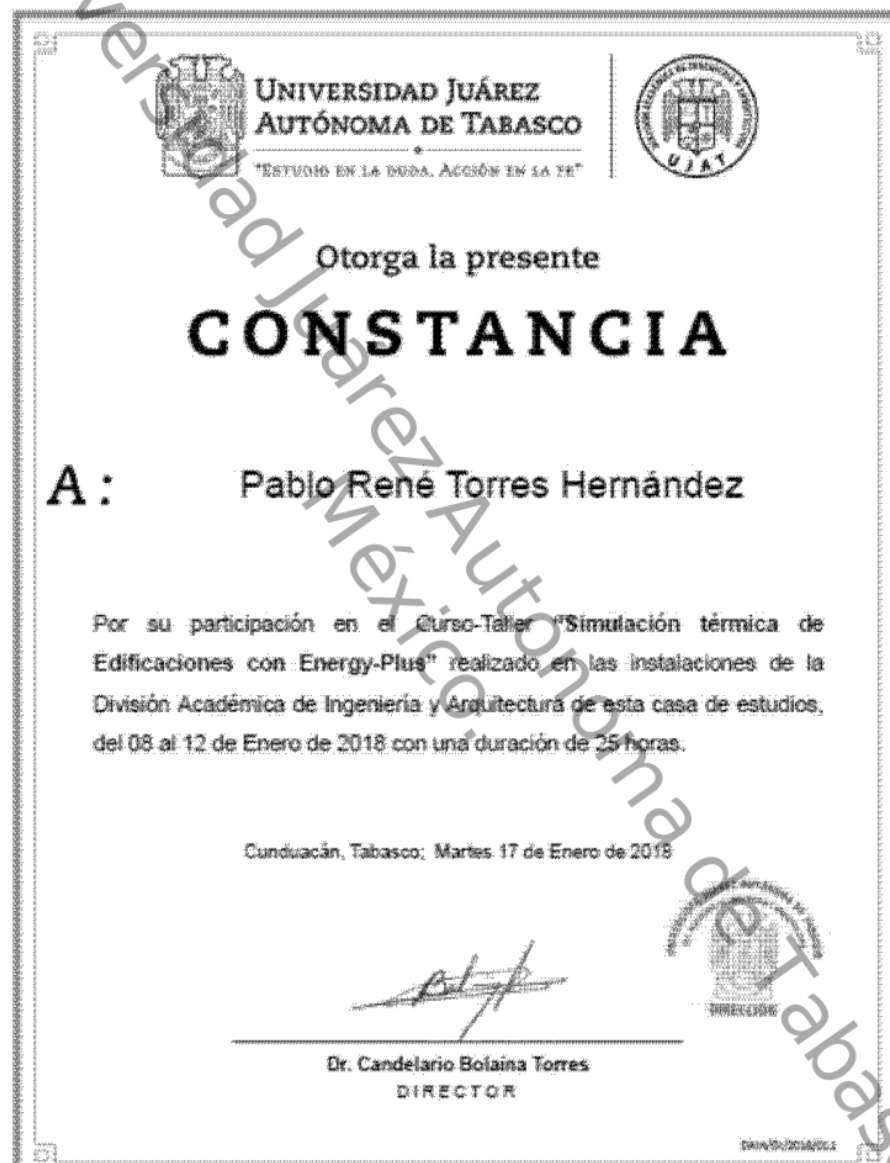


2) Ponencia

Participación en la semana de Difusión y Divulgación científica 2017, en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



3) Cursos de actualización continúa.



 **UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Pablo René Torres Hernández

Por su participación en el Curso-Taller "*Dinámica de Fluido Computacional para la simulación térmica de Edificaciones*" realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 12 de Enero de 2018 con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; Martes 17 de Enero de 2018





Dr. Candelario Bolaina Torres
DIRECTOR

DAIA/01/2018/0021

Desarrollo de un Tostador Solar de Cacao

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	ri.ujat.mx Internet	355 palabras — 2%
2	hdl.handle.net Internet	184 palabras — 1%
3	docplayer.es Internet	169 palabras — 1%
4	repositorio.lamolina.edu.pe Internet	49 palabras — < 1%
5	www.buenastareas.com Internet	36 palabras — < 1%
6	cdigital.uv.mx Internet	30 palabras — < 1%
7	www.coursehero.com Internet	26 palabras — < 1%
8	Emmanuel Ohene Afoakwa. "Chocolate Science and Technology", Wiley, 2010 Crossref	25 palabras — < 1%
9	bibing.us.es Internet	24 palabras — < 1%
10	repository.unhas.ac.id	

20 palabras — < 1 %

11 www.studocu.com
Internet

20 palabras — < 1 %

12 Bayramova, Gunay. "Turk Kahvesi pisirme yontemleri Ve Tarihsel gelisiminin urun tasarimi baglaminda Incelenmesi", Marmara Universitesi (Turkey), 2020
ProQuest

19 palabras — < 1 %

13 teses.usp.br
Internet

19 palabras — < 1 %

14 archive.org
Internet

18 palabras — < 1 %

15 es.slideshare.net
Internet

18 palabras — < 1 %

16 repositorio.ucv.edu.pe
Internet

18 palabras — < 1 %

17 www.infoaserca.gob.mx
Internet

17 palabras — < 1 %

18 www.virtualpro.co
Internet

17 palabras — < 1 %

19 aip.scitation.org
Internet

16 palabras — < 1 %

20 vdocuments.site
Internet

16 palabras — < 1 %

21 www.colef.mx
Internet

16 palabras — < 1 %

EXCLUIR CITAS ACTIVADO
EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES DESACTIVADO
EXCLUIR COINCIDENCIAS < 15 PALABRAS