



1859

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD DE LA ENERGIA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ
APROVECHANDO LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CON
GEOMETRÍA PARVATI”

Tesis de Grado previo a optar al
título de Ingeniero Electromecánico.

DIRECTOR:

ING. CRISTIAN VINICIO ORTEGA REYES

AUTOR:

ANGEL EDUARDO PALACIOS MONTAÑO

LOJA-ECUADOR

2021

CERTIFICACIÓN

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ APROVECHANDO LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CON GEOMETRÍA PARVATI”, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el señor egresado: Angel Eduardo Palacios Montaña, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Lugar y Fecha: Loja, 28 de agosto del 2020



Firmado electrónicamente por:
**CRISTIAN
VINICIO ORTEGA
REYES**

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, **ANGEL EDUARDO PALACIOS MONTAÑO**, declaro ser autor del presente trabajo de tesis **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ APROVECHANDO LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CON GEOMETRÍA PARVATI”**, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula: 1105806226

Fecha: 11/08/2021

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, **ANGEL EDUARDO PALACIOS MONTAÑO**, declaro ser autor de la tesis titulada: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ APROVECHANDO LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CON GEOMETRÍA PARVATI”**, como requisito para optar al grado de INGENIERO ELECTROMECAÁNICO; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los once días del mes de agosto del dos mil veinte y uno.

Firma:

Autor: Ángel Eduardo Palacios Montaña

Cédula:1105806226

Dirección: Loja (Cdla. Turunuma)

Correo electrónico personal: aepalaciosmt@gmail.com

Correo electrónico institucional: aepalaciosm@unl.edu.ec

Teléfono: 072613874 **Celular:** 0968005467

Fecha: 11/08/2021

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes, Mg. Sc.

Tribunal de grado: Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc.

Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD.

Ing., Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

DEDICATORIA

Este proyecto de tesis se lo dedico a mis padres Mercy y Bolivar que con amor y confianza me han brindado su apoyo incondicional, me han enseñado a nunca rendirme y esforzarme por alcanzar mis metas.

A mis hermanas, Leidy y Josselyn, por acompañarme y brindarme su cariño incondicional en cada etapa de mi vida, por caminar a mi lado y ser quienes me motivan a ser mejor cada día.

A mi familia y amigos quienes supieron comprenderme y orientarme en cada momento.

Ángel Palacios

AGRADECIMIENTO

Expreso mi gratitud al cuerpo docente de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja por brindarme sus conocimientos, que permitieron el desarrollo de mis estudios.

Agradezco al Ing. Cristian Ortega, mi director de Tesis, por brindarme sus conocimientos contribuyendo a la realización del presente proyecto.

A todas las personas que han confiado en mí y me han estado apoyándome incondicionalmente.

Ángel Palacios

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA	iii
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
TABLA DE ILUSTRACIONES	ix
TABLA DE ECUACIONES	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
SIMBOLOGÍA	xiv
1. TÍTULO	1
2. RESUMEN	2
3. INTRODUCCIÓN	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA	7
4.1. Generalidades del Procesado de Café.	7
4.1.1. Secado de Café.	7
4.1.2. Tipos de Café	7
4.1.3. Procesos de Secado	8
4.1.4. Tipos de Secado del Café.	8
4.2. Cocina Solar de doble ángulo	11
4.3. Recomendación sobre la calidad del Café	12
4.4. Geometría de la Parábola	14
4.5. Factores de Diseño	17
4.5.1. Metodología para el cálculo de la cámara de Secado.	17
4.5.2. Metodología para el cálculo de energía que puede brindar el colector Parvati.	18
4.5.3. Metodología para el cálculo de energía requerida para evaporar la humedad en el grano de café.	21
4.5.4. Metodología para calcular el rendimiento del secador solar de café	22
4.6. Metodología para medir el contenido de humedad de café pergamino.	23
4.7. Control de Secadores de Café.	25
4.7.1. Arduino	25
4.7.2. Lenguaje Arduino	25
4.7.3. Sensores.	28
4.7.4. Actuadores	33
4.7.5. Relés o Relays	34

4.7.6. Celda de Carga.	35
4.7.7. Ventiladores	36
4.8. Revisión de Proyectos previos de Secadores de Café.	38
4.8.1. Proyecto 1	38
4.8.2. Proyecto 2	39
4.9. Fundamentos de la Transferencia de Calor	40
4.9.1. Antecedentes	40
4.9.2. Termodinámica	40
4.9.3. Calor	41
4.10. Energía Solar	43
4.10.1. Radiación Solar en la Ciudad de Loja	48
5. MATERIALES Y MÉTODOS	51
5.1. Materiales	51
5.2. Métodos	52
6. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	55
6.1. Diseño conceptual del prototipo de secador de café accionado con energía solar térmica.	55
6.2. Experimentación para obtención de datos	73
6.2.1. Condiciones de Monitoreo	73
6.2.2. Disposición de sensores	73
6.2.3. Representación gráfica de los resultados obtenidos	75
6.2.4. Radiación Solar en la Ciudad de Loja	75
6.2.5. Control de temperatura	76
6.2.6. Cámara de Secado	78
6.2.7. Curva de Secado	79
6.2.8. Eficiencia del Colector	81
6.3. Comparación de resultados obtenidos en las pruebas con los cálculos realizados.	85
6.4. Costo del secador solar de café.	88
7. DISCUSIÓN	90
8. CONCLUSIONES	93
9. RECOMENDACIONES	94
10. BIBLIOGRAFÍA	95
11. ANEXOS	98

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tipos de granos de Café. Fuente (Ruggiero, 2018)	7
Ilustración 2: Secado en Patio. Fuente (Coffee IQ, 2017)	9
Ilustración 3: Secado en carros de madera. Fuente (Coffee IQ, 2017)	9
Ilustración 4: Secado en elbas. Fuente (Coffee IQ, 2017)	10
Ilustración 5: Secado solar por marquesina. Fuente (Coffee IQ, 2017)	10
Ilustración 6: Secado solar mecánico. Fuente (Pinhalense, 2009)	11
Ilustración 7: Cocina Solar Parvati. Fuente (Maldonado, León, Solórzano, Álvarez, & Montaña, 2012)	12
Ilustración 8: Curva Proceso de Secado. Fuente (Diaz, 2014)	13
Ilustración 9: Geometría de Parábola. Fuente (Kalogirou, 2014)	14
Ilustración 10: Parábola con ángulo de borde menor a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	15
Ilustración 11: Parábola con ángulo de borde mayor a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	16
Ilustración 12: Parábola con ángulo de borde igual a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	16
Ilustración 13: Método Gravimet. Fuente.	24
Ilustración 14: Termocupla Tipo K. Fuente (Electronics, 2019)	29
Ilustración 15: Termorresistencia Pt100 (ElectroCrea, 2018)	30
Ilustración 16: Sensor LM35 y Conexionado. Fuente(Isaac, 2018)	31
Ilustración 17: Sensor DHT22 y Conexionado. Fuente(Mechatronics, 2018)	32
Ilustración 18: Sensor DHT11. Fuente(Mechatronics, 2018)	33
Ilustración 19: Actuador Lineal Eléctrico. Fuente(Iturralde, 2019)	34
Ilustración 20: Relé 5 v. Fuente(Prometec, 2017)	34
Ilustración 21: Celda de Carga. Fuente(Naylampmechatronics, 2015)	35
Ilustración 22: Instalación celda de Carga. Fuente(Naylampmechatronics, 2015)	35
Ilustración 23: Ventiladores Centrífugos. Fuente(SolerPalau, 2015b)	36
Ilustración 24: Ventiladores Axiales. Fuente(SolerPalau, 2015a)	36
Ilustración 25: Secado de Café impulsado por energía fotovoltaica. Fuente (Prada et al., 2019)	39
Ilustración 26: Secador mecánico de café. Fuente (Gutiérrez-Flórez & Copete-López, 2009)	40
Ilustración 27: Radiación Solar. Fuente (Cengel & Ghajar, 2011)	42
Ilustración 28: Tipos de Radiación Solar. Fuente (Cengel & Ghajar, 2011)	43
Ilustración 29: Piranómetro Digital. Fuente(Amazon, 2012)	48
Ilustración 30: Cama de Secado. Fuente (Autor)	56
Ilustración 31: Geometría de Parábola. Fuente (Kalogirou, 2014)	56
Ilustración 32: Parábola con ángulo de borde menor a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	57
Ilustración 33: Parábola con ángulo de borde mayor a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	58

Ilustración 34: Parábola con ángulo de borde igual a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)	58
Ilustración 35: Dimensiones Parábola. Fuente (Autor)	60
Ilustración 36: Estructura Parvati. Fuente (Autor)	60
Ilustración 37: Diseño de Estructura Parvati. Fuente (Autor)	61
Ilustración 38: Fuerzas para Cálculo de Resorte. Fuente (Autor)	70
Ilustración 39: Cálculo de Tensión en Cable. Fuente (Autor)	70
Ilustración 40: Calculo Fuerza de Actuador. Fuente (Autor)	71
Ilustración 41: Disposición de Sensor de Temperatura de Café. Fuente (Autor)	74
Ilustración 42: Disposición de Sensor de Temperatura y Humedad de la Cámara de Secado. Fuente (Autor)	74
Ilustración 43: Disposición de Sensor de Temperatura y Humedad del Medio Ambiente. Fuente (Autor)	75
Ilustración 44: Radiación Solar Promedio. Fuente (Autor)	76
Ilustración 45: Comportamiento de Sistema de Control Dia 1. Fuente (Autor)	77
Ilustración 46: Comportamiento de Sistema de Control Dia 2. Fuente (Autor)	77
Ilustración 47: Comportamiento de Sistema de Control Dia 3. Fuente (Autor)	78
Ilustración 48: Comparación Temperaturas. Fuente (Autor)	78
Ilustración 49: Curva de Secado del Café obtenida por el método Gravimet. Fuente (Autor)	80
Ilustración 50: Comparación Rendimiento-Radiación. Fuente (Autor)	83
Ilustración 51: Comparación Rendimiento-Temperatura. Fuente (Autor)	84
Ilustración 52: Comparación Rendimiento-Humedad. Fuente (Autor)	84
Ilustración 53: Comparación Rendimiento-Reducción Humedad. Fuente (Autor)	85
Ilustración 54: Curva de Secado Ideal. Fuente (Autor)	87
Ilustración 55: Curva de Secado obtenida Experimentalmente. Fuente (Autor)	87

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Longitud Focal	16
Ecuación 2: Radio de la Parábola	16
Ecuación 3: Altura de Parábola	17
Ecuación 4: Longitud Parábola	17
Ecuación 5: Área de Apertura	17
Ecuación 6: Diámetro del Foco	17
Ecuación 7: Ecuación de la Parábola	17
Ecuación 8: Volumen de la Cámara	17
Ecuación 9: Área de la Cámara de Secado	18
Ecuación 10: Longitud de la Cama de Secado	18
Ecuación 11: Coeficiente de Pérdidas	18
Ecuación 12: Coeficiente de Perdidas por Radiación	18
Ecuación 13: Coeficiente de Pérdidas por el Viento	19
Ecuación 14: Coeficiente de Pérdidas por Convección	19
Ecuación 15: Número de Nusselt	19
Ecuación 16: Número de Reynolds	20
Ecuación 17: Factor de Pérdidas del Colector	20
Ecuación 18: Factor de Eliminación de Calor	20
Ecuación 19: Energía Útil	21
Ecuación 20: Masa de Agua a Evaporar	21
Ecuación 21: Calor de Vaporización Café	21
Ecuación 22: Calor Específico del Café	22
Ecuación 23: Calor Sensible	22
Ecuación 24: Calor Latente	22
Ecuación 25: Calor Total	22
Ecuación 26: Rendimiento del Secador	23
Ecuación 27: Porcentaje de Humedad	24
Ecuación 28: Cálculo de Caudal de Ventilación	37
Ecuación 29: Calor Específico del Café	37
Ecuación 30: Calor de reducción de Temperatura	38
Ecuación 31: Flujo Másico de Aire	38
Ecuación 32: Coeficiente de Transmitancia Rb	44

Ecuación 33: Constante de Corrección 1	44
Ecuación 34: Constante de Corrección 2	44
Ecuación 35: Constante de Corrección 3	44
Ecuación 36: Ángulo Cenital	45
Ecuación 37: Declinación Solar	45
Ecuación 38: Radiación Solar Extraterrestre	46
Ecuación 39: Radiación Solar Directa	47
Ecuación 40: Coeficiente de Transmitancia R_d	47
Ecuación 41: Radiación Solar Difusa	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores de Corrección.	44
Tabla 2: Ángulo horario en función de la hora.	45
Tabla 3: Número del día.	46
Tabla 4: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.	48
Tabla 5: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.	49
Tabla 6: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.	49
Tabla 7: Promedio de Radiación Solar Directa.	63
Tabla 8: Comparativa de Humedades obtenidas	81
Tabla 9: Datos de Rendimiento del Secador de Café.	81
Tabla 10: Comparación de Radiación Solar Cálculos-Experimentación.	85
Tabla 11: Comparación de Energía que Proporciona el colector Cálculos-Experimentación.	86
Tabla 12: Comparación de Rendimiento del Secador Solar de Café.	86
Tabla 13: Costo de Construcción de Secador de Café.	88

SIMBOLOGÍA

Wa	Abertura de la Parábola
φ_r	Ángulo de Borde
r_r	Radio que describe la abertura total y el foco de la parábola
r	Radio de un punto local de la parábola
φ	Ángulo descrito por un punto local de la parábola
f	Longitud Focal
H_p	Altura de la Parábola
S	Longitud de la Parábola
A_p	Área de apertura de la Parábola
d_o	Diámetro mínimo del foco
y^2	Función de la Parábola
U	Coefficiente de Pérdidas
h_r	Coefficiente de Pérdidas por Radiación
h_w	Coefficiente de pérdidas por transferencia de calor del viento
T_r	Temperatura de la Cámara de Secado
σ	Coefficiente de Stefan Boltzmann
ε	Emisividad de la cámara de Secado
h_{fi}	Coefficiente de pérdidas por convección
V	Velocidad del Fluido
L	Longitud del Colector
N_u	Número de Nusselt
K	Coefficiente de Conductividad Térmica del Fluido
D	Diámetro de la Cámara de Secado
R_e	Número de Reynolds
ρ	Densidad del Fluido
μ	Viscosidad dinámica del fluido
F'	Factor de Pérdidas del Colector
D_o	Diámetro Exterior de la Cámara de Secado
D_i	Diámetro Interior de la Cámara de Secado

F_R	Factor de Eliminación de Calor
\dot{m}	Flujo másico del Fluido
A_r	Área de la Cámara de Secado
C_p	Calor específico del fluido
Q_u	Energía Útil del Colector
S_d	Irradiancia Directa sobre la Superficie
T_i	Temperatura Interna de la Cámara de Secado
T_a	Temperatura Ambiente
η	Rendimiento del Colector
M_a	Masa de Agua a Evaporar
M_p	Masa del Grano de Café a Secar
H	Humedad del Grano de Café Lavado
L	Calor de Vaporización del Café
θ	Temperatura del Café en °C
C_p	Calor específico del Café
Q_T	Calor Total
Ch_f	Contenido Final de Humedad del Café
P_i	Masa Inicial del Café
Ch_i	Contenido Inicial de Humedad de Café
P_f	Masa Final del Café

1. TÍTULO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CAFÉ APROVECHANDO LA
ENERGÍA SOLAR TÉRMICA CON GEOMETRÍA PARVATI.**

2. RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción y evaluación de un secador de café a través de energía solar con estructura de doble ángulo denominada Parvati. El desarrollo del prototipo tiene como objetivo lograr un secado óptimo de café especialmente mediante el control de temperatura. La forma de captación de energía es similar a sistemas de concentración parabólicos, siendo la zona focal en donde se encuentra ubicada la cámara de secado del grano. En esta cámara de forma cilíndrica y superficie translúcida, se ubicaron tres camas de secado con una capacidad total de 25 kg de café, siendo secados exitosamente, alcanzando la humedad requerida del 11,3%, en un periodo de 33 días con una temperatura que no sobrepasó los 35°C; ajustándose al perfil de secado propuesto inicialmente obtenido de la literatura especializada consultada. En la fase de pruebas se monitoreó frecuentemente la temperatura, humedad del café y del ambiente para asegurar el proceso, así como para validar el sistema de control de temperatura implementado, el cual consiste primordialmente en un mecanismo que modifica la capacidad de concentración de calor por medio del cambio de los ángulos de inclinación de las placas reflectoras y secundariamente mediante el accionamiento de un ventilador extractor de calor. La geometría del concentrador solar fue inspirada en el modelo de cocina solar denominada Parvati y diseñada en base a la teoría de la parábola lo que permitió definir la geometría y ubicación de la cámara de secado, así como de las placas reflectoras.

Palabras claves: Secado Solar, Secado de Café, Parvati, Parábola, Temperatura, Humedad, Placas Reflectoras.

ABSTRACT

In the present work, the design, construction and evaluation of a coffee dryer using solar energy with a double angle structure called Parvati was carried out. The development of the prototype aims to achieve an optimal drying of coffee, especially through temperature control. The form of energy capture is similar to parabolic concentration systems, being the focal zone where the bean drying chamber is located. In this chamber of cylindrical shape and translucent surface, three drying beds were located with a total capacity of 25 kg of coffee, being successfully dried, reaching the required humidity of 11.3%, in a period of 33 days with a temperature that did not exceed 35°C; adjusting to the drying profile initially proposed obtained from the specialized literature consulted. During the testing phase, the temperature and humidity of the coffee and the environment were frequently monitored to ensure the process, as well as to validate the temperature control system implemented, which consists primarily of a mechanism that modifies the heat concentration capacity by changing the inclination angles of the reflector plates and secondarily by activating a heat extractor fan. The geometry of the solar concentrator was inspired by the Parvati solar stove model and designed based on the parabola theory, which allowed defining the geometry and location of the drying chamber, as well as the reflector plates.

Keywords: Solar drying, Coffee drying, Parvati, Parable, Temperature, Humidity, Reflective Plates.

3. INTRODUCCIÓN

El café en la actualidad es uno de los productos alimenticios más comercializados a nivel mundial puesto que su procesado y posterior venta permiten obtener ingresos económicos importantes en función de la calidad que posee. Ecuador es un país agrónomo en el cual entre sus principales actividades económicas es la venta de café. El procesado del café básicamente se da en 5 etapas, el cultivo, el despulpado, el secado, el tueste y el molido. El presente proyecto se enfoca en la etapa del secado y el principal motivo por el cual se desarrolla, es porque en el país existen básicamente dos estaciones climáticas que son el verano e invierno, el secado del café se lo puede realizar en las mejores condiciones en verano, sin embargo el problema aparece cuando es necesario obtener energía solar suficiente para el secado en invierno, para solucionar este inconveniente se plantea el diseño, construcción y monitoreo del prototipo de secador de café con geometría de doble ángulo o denominada Parvati que permita aprovechar hasta los mínimos niveles de radiación solar. Mediante el control se pueden establecer las condiciones de las variables como son la temperatura y humedad, al controlar las mismas se puede obtener un secado adecuado con las condiciones preestablecidas para obtener la humedad requerida en el grano.

Los objetivos planteados para el presente proyecto son:

Objetivo General

Proponer un sistema de secado de café a través de energía solar-térmica con geometría Parvati.

Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de secado de café alimentado a través de energía solar térmica.
- Construir un prototipo que permita observar el proceso de secado a través de la cámara de secado.
- Validar la información obtenida a través de cálculos con el prototipo construido.

Para poder desarrollar el presente proyecto se inició con la elección de una recomendación para el secado de café planteada por (Diaz, 2014) para seguir a lo largo de la etapa de experimentación, posteriormente se realizaron los respectivos cálculos de los elementos que conforman la cámara de secado y el colector solar para luego realizar la respectiva selección de los mismos, una vez adquiridos los diferentes elementos se procedió a la construcción del colector solar. Finalmente se realizó la adquisición de los elementos necesarios para el monitoreo y control del secador de café.

En la fase de adquisición de elementos para la construcción se presentó un inconveniente al intentar adquirir el actuador lineal que permite mover la estructura Parvati debido a que en Loja no existen tiendas especializadas en instrumentación industrial y por la situación social que se presenta en el país (Estado de Emergencia). Con relación a los demás elementos tanto de la construcción como del monitoreo y control no se presentaron inconvenientes.

La primera parte del trabajo abarca la recopilación de toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto, tales como elementos de construcción, elementos de automatización, recomendación para realizar el secado del café, metodología para el cálculo de sus dimensiones, entre otros aspectos importantes.

En la siguiente parte se realizaron los cálculos necesarios para poder dimensionar los diferentes elementos requeridos para la construcción y monitoreo del secador de café. Se seleccionaron los diferentes elementos y dispositivos del sistema, en base a los cálculos realizados, para posteriormente construir el prototipo. Consecutivamente se realizaron las pruebas necesarias para obtener resultados que permitieron corroborar si es posible usar el secador de café para cumplir con las condiciones y curva de secado propuesta por el Dr. Manuel Diaz en el año 2014. Finalmente se expone el comportamiento de las variables en el tiempo de monitoreo para

llegar a obtener una humedad del 10 % – 12 %, así también se manifiestan las recomendaciones con las que se pueden obtener mejores resultados para el proceso de secado de café.

Con el diseño, construcción, monitoreo y los datos obtenidos al realizar las pruebas correspondientes se cumplen los tres objetivos planteados.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Generalidades del Procesado de Café.

4.1.1. Secado de Café.

El secado del café es uno de los procesos necesarios para obtener un café de alta calidad, consiste en reducir la humedad a un nivel en el cual no pierda sus diferentes propiedades de sabor, olor, entre otros y pueda ser usado para el siguiente proceso del tostado. El método de secado comúnmente utilizado es el de tipo en patios o mediante marquesinas. (Parra-Coronado et al., 2008)

4.1.2. Tipos de Café

En Ecuador se cultivan las principales especies de café mundialmente comerciadas como son *Coffea arábica* L o Café Arábica y *Coffea Canephora* Pierre ex Froehner o Café Robusta (Ilustración 1). Las nuevas tecnologías han permitido aumentar la productividad del café arábica hasta tres tm/ha y el café robusta hasta cinco tm/ha. (Ponce Vaca, Orellana Suarez, Acuña Velásquez, Alfonso Aleman, & Fuentes Figueroa, 2018)



Ilustración 1: Tipos de granos de Café. Fuente (Ruggiero, 2018)

4.1.2.1. Variedad Arábica

El cultivo de café arábica en el Ecuador es de aproximadamente el 96% del cultivo total de café (MAGAP, 2016). Para que el café arábica al ser cultivado tenga un desarrollo óptimo se

requiere que existan de 180 a 200 días lluvias, aunque el cafeto presenta cierta tolerancia a las sequías la producción del mismo disminuye notoriamente. El tiempo necesario para realizar la primera recolección es de aproximadamente de 3 a 4 años desde el momento que es sembrado y se los puede encontrar en la Sierra, Costa y Amazonía. Las principales variedades arábicas cultivadas en el Ecuador son: Típica, Caturra, Bourbon, Pacas, Catuaí, Catimor y Sarchimor. (Inversiones, 2013)

4.1.2.2. Variedad Robusta

En contraste con el café arábica el café robusta requiere de un clima tropical que posea altas precipitaciones o sistemas de riego, normalmente este tipo de café se lo encuentra al norte la región amazónica. (Inversiones, 2013)

En el Ecuador se produce las siguientes presentaciones de café:

- Café Verde
- Café tostado, en grano y/o molido
- Café soluble o instantáneo

4.1.3. Procesos de Secado

El secado es una de las etapas de procesamiento de café en la cual se tiene la finalidad de disminuir el nivel de humedad que posee el grano para que pueda almacenarse de tal forma que no adquiera un mal olor o sabor. El proceso de secado recomendado por el Dr. Manuel Díaz manifiesta que la humedad del café debe estar del 10 % - 12 %. (Díaz, 2014)

4.1.4. Tipos de Secado del Café.

A continuación, se detallan varios procesos que permiten el secado del café, si bien la mayoría no son objeto de atención en el presente trabajo de tesis, constituyen propuestas alternativas interesantes.

4.1.4.1. Secado en patio.

En este método de secado el café se debe colocar en patios de cemento o ladrillo (Ilustración 2) en capas de aproximadamente 3,5 cm de alto, se debe tener en cuenta que los patios deben ser planos y deben tener una leve inclinación.



Ilustración 2: Secado en Patio. Fuente (Coffee IQ, 2017)

4.1.4.2. Secado en carros de madera

En este secado los carros (Ilustración 3) son de madera tipo cajón montados sobre rieles con techos de zinc y pisos de esterilla o madera.



Ilustración 3: Secado en carros de madera. Fuente (Coffee IQ, 2017)

4.1.4.3. Secado en elbas

El secado con elbas (Ilustración 4) consiste en cajones con piso de cemento o madera y techo de zinc similar al secado en carros de madera.



Ilustración 4: Secado en elbas. Fuente (Coffee IQ, 2017)

4.1.4.4. Secado solar por marquesina

El secado solar por marquesina (Ilustración 5) es una de los tipos de secado más comunes, consta de una plancha de cemento cubiertas de guadua y plástico con una geometría tipo domo lo cual permite la circulación de aire evitando que exista retención de humedad en el interior de la estructura, normalmente se suelen construir en un área de 25 m² y máximo a una altura de 2,10 m en el punto más alto.



Ilustración 5: Secado solar por marquesina. Fuente (Coffee IQ, 2017)

4.1.4.5. Secado mecánico

El secado mecánico (Ilustración 6) se utiliza principalmente en fincas donde la producción supere las 500 arrobas de café por año. Las estructuras para este secado pueden ser de diferentes tamaños, formas, fuente de alimentación y capacidad de secado.

El principio de funcionamiento de este tipo de secadores es que en la cámara se introduce aire a una temperatura de 45° o 50° el mismo es impulsado por un ventilador para que pueda realizar el secado del café.

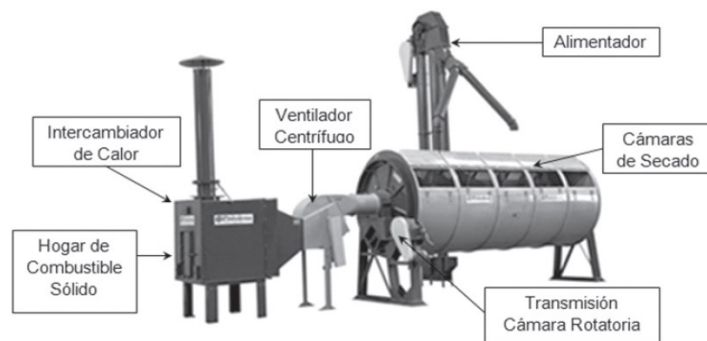


Ilustración 6: Secado solar mecánico. Fuente (Pinhalense, 2009)

4.2. Cocina Solar de doble ángulo

En este apartado se menciona la cocina solar, cuya geometría se tomará como referencia para el diseño de la estructura Parvati.

Una cocina solar (Ilustración 7) cuece porque su interior se ha calentado por la energía del sol. La luz solar, tanto directa como reflejada. Este calor en la interior causa que la temperatura dentro de la cocina solar aumente hasta que el calor que se pierda de la cocina sea igual al aumento del calor solar. Se alcanzan fácilmente temperaturas suficientes para cocinar comida y pasteurizar agua.



Ilustración 7: Cocina Solar Parvati. Fuente (Maldonado, León, Solórzano, Álvarez, & Montaña, 2015)

La cocina solar de doble ángulo o denominada Parvati está formada por 24 paneles reflectivos pequeños para poder de esta forma concentrar la luz emitida por los rayos solares y evitar pérdidas de calor. En esta cocina es posible cocinar en disposiciones de ángulos de 45° y 60°, alcanzando una temperatura máxima de 140°C en el interior de un recipiente de cocción vacío en un día soleado a una temperatura ambiente de 21°C. La cocina mantiene su estructura de doble ángulo debido a un cordón que une los paneles. (Uyaguari Carrión, 2014)

4.3. Recomendación sobre la calidad del Café

A continuación, se presenta una recomendación para realizar el proceso de secado de café, con el fin de obtener un café de calidad.

Según (Diaz, 2014) especialista en la producción y procesado de café, reconocido internacionalmente, propone un proceso de secado para obtener un café de buena calidad, a continuación (Ilustración 8) se muestra los lineamientos para llevar a cabo dicho proceso de secado:

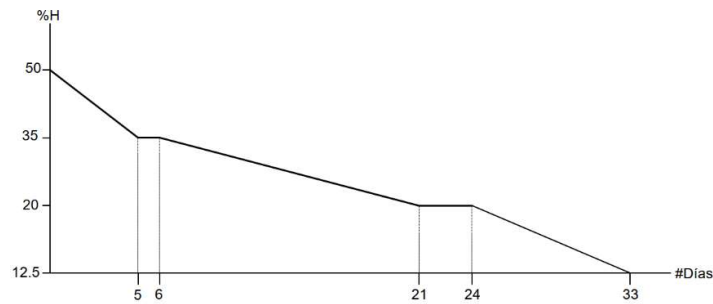


Ilustración 8: Curva Proceso de Secado. Fuente (Diaz, 2014)

Se deben realizar tres ciclos de secado con periodos de descanso o estabilización para preservar la fragancia y mejorar su dulzura. Se recomienda seguir el siguiente esquema de secado:

- a) Eliminar rápidamente la humedad superficial a través de un buen escurrido y aireado, evitando daño mecánico y fermentaciones descontroladas.
- b) Primer ciclo de secado: en la primera fase de secado durante cinco días hay que dar al café un ciclo continuo hasta llegar a 35 % de humedad.
- c) Primer periodo de descanso corto: se deja estabilizar enseguida el lote de café por un día, pero monitoreándolo para vigilar que no se generen hongos o malos olores.
- d) Segundo ciclo de secado: luego del primer periodo de descanso se le da otro ciclo de secado al café de alta calidad durante 15 días para reducir la humedad hasta llegar a un 20 % de humedad.

e) Segundo periodo de descanso un poco más largo: se vuelve a dejar el lote de café bien cubierto en lugar seco y fresco, completamente oscuro, por tres días. De nuevo, hay que monitorear frecuentemente estos lotes para no tener problemas de formación de hongos.

f) Último ciclo de secado: Se realiza durante nueve días en donde se debe lograr una humedad de 12.5 %, que es la ideal para entregar el lote de café para concurso o para venta.(Diaz, 2014)

4.4. Geometría de la Parábola

En el libro elaborado por (Duffie & Beckman, 2013) se muestra una metodología (Ilustración 8) con la cual es posible calcular las dimensiones de la geometría denominada Parvati necesaria para la construcción de la estructura del colector, a continuación, se muestran las fórmulas usadas y la elección de los diferentes factores que intervienen en su dimensionamiento.

Para la elección de la geometría de la parábola (Ilustración 9) en la cual se basa la construcción del colector Parvati se tiene:

Se muestra un gráfico con la geometría de los elementos necesarios:

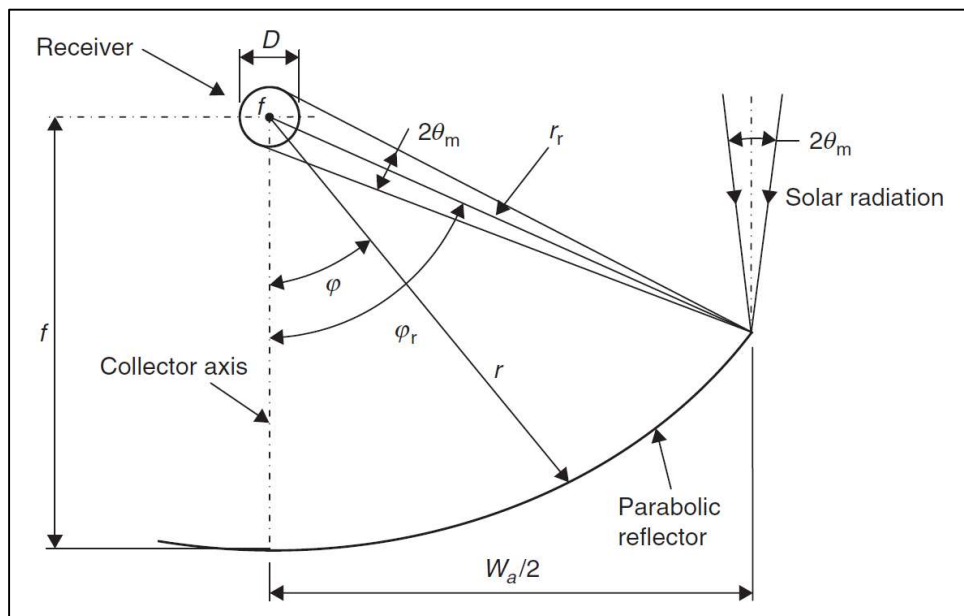


Ilustración 9: Geometría de Parábola. Fuente (Kalogirou, 2014)

En donde se tiene que:

- Wa = Abertura total de la parábola.
- φ_r = ángulo que se forma entre la abertura total con respecto al eje principal de la parábola donde se ubica el foco, o también llamado ángulo de borde.
- r_r = Distancia que se conoce como el radio que describe la abertura total y el foco de la parábola.
- r = Radio de un punto local de la parábola.
- φ = ángulo descrito por un punto local de la parábola.
- f = Longitud focal.

Para el dimensionamiento de la parábola es necesario en primer lugar definir φ_r , para esto se usa un estudio realizado por (Riveros & Oliva, 1985) en donde se define gráficamente el efecto que produce la utilización de los ángulos mayores, iguales y menores a 90 grados, a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Para ángulos de borde menores a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 10):

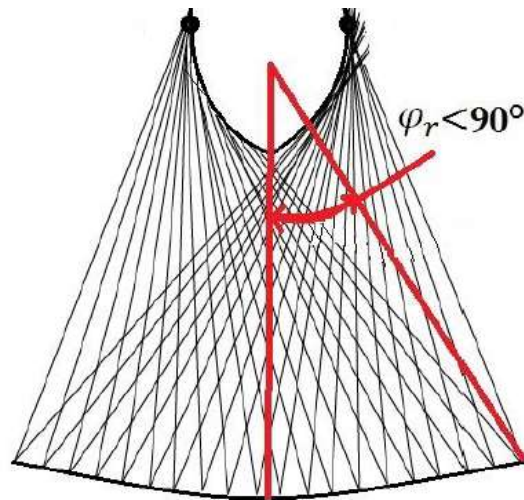


Ilustración 10: Parábola con ángulo de borde menor a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

Para ángulos de borde mayores a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 11):

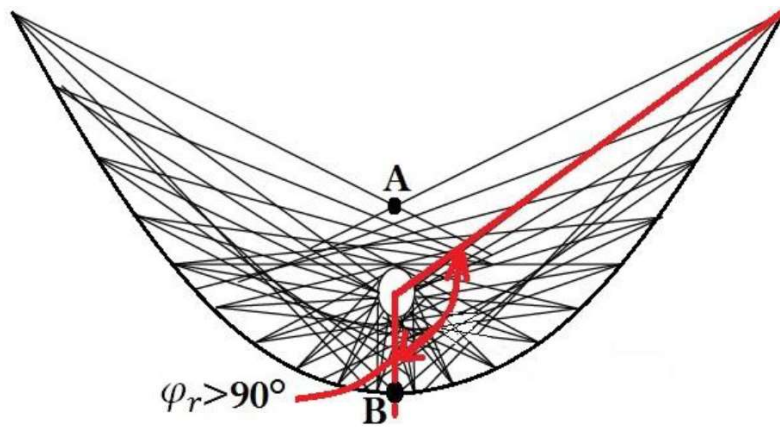


Ilustración 11: Parábola con ángulo de borde mayor a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

Para ángulos de borde iguales a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 12):

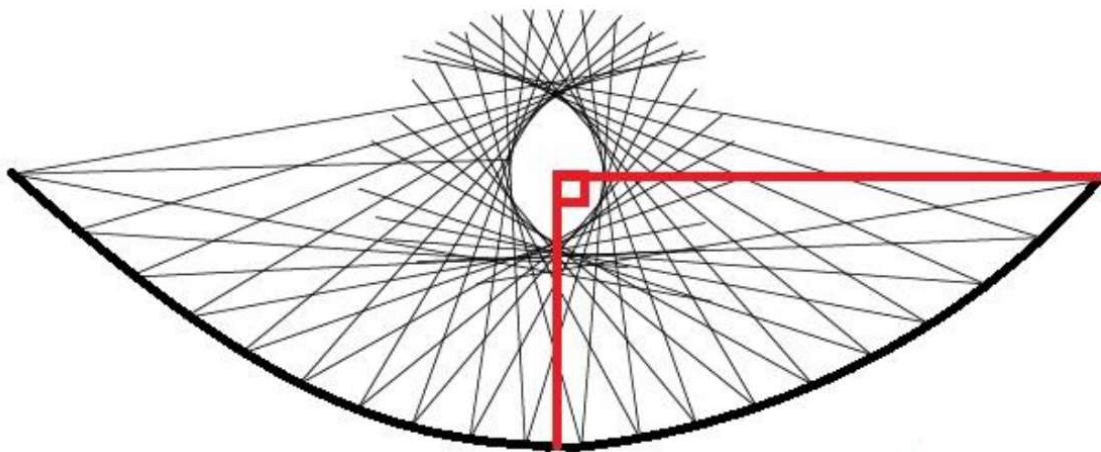


Ilustración 12: Parábola con ángulo de borde igual a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

- Para calcular la longitud focal se tiene:

$$f = \frac{W_a}{4 \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)} \text{ [m]} \quad \text{Ecuación 1: Longitud Focal}$$

- Para calcular el radio de la parábola se tiene:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos(\varphi_r)} \text{ [m]} \quad \text{Ecuación 2: Radio de la Parábola}$$

- Para calcular la altura de la parábola se tiene:

$$Hp = \frac{W_a^2}{16f} \text{ [m]} \quad \text{Ecuación 3: Altura de Parábola}$$

- Para calcular la longitud de la parábola se tiene:

$$S = \frac{Hp}{2} \left\{ \sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \ln \left[\sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right] \right\} \text{ [m]} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación 4:} \\ \text{Longitud Parábola} \end{array}$$

- Para calcular el área de apertura se tiene:

$$Ap = W_a L \text{ [m]} \quad \text{Ecuación 5: Área de Apertura}$$

- Para calcular el diámetro mínimo del foco se tiene:

$$d_o = 2r_r \sin \frac{\theta_m}{2} \text{ [m]} \quad \text{Ecuación 6: Diámetro del Foco}$$

- La función que permite el trazado de la parábola es:

$$y^2 = 4fx \quad \text{Ecuación 7: Ecuación de la Parábola}$$

4.5. Factores de Diseño

A continuación, se muestran la formulación necesaria para poder dimensionar los diferentes elementos que conforman el secador de café, entre los cuales se encuentran la estructura Parvati, cámara de secado, entre otros aspectos importante.

4.5.1. Metodología para el cálculo de la cámara de Secado.

Para el cálculo de la geometría de la cámara de secado se tiene:

- Para calcular el volumen de la cámara se tiene:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ecuación 8: Volumen de la Cámara}$$

Donde:

- $V = \text{Volumen de la Cámara de Secado.}$
- $m = \text{Masa de Café a Secar.}$

- $\rho = \text{Densidad del Caf e.}$

- Para calcular el área de la cámara de secado se tiene:

$$A = \frac{V}{h} \quad \text{Ecuación 9:  rea de la Cámara de Secado}$$

Donde:

- $A = \text{área de la Cámara de Secado.}$
- $V = \text{Volumen de la Cámara de Secado.}$
- $h = \text{ ltura de la cama de secado.}$

- Para calcular la longitud de la cama de secado se tiene:

$$L = \frac{A}{a} \quad \text{Ecuación 10: Longitud de la Cama de Secado}$$

Donde:

- $L = \text{Longitud de la cama de Secado.}$
- $A = \text{área de la Cámara de Secado.}$
- $a = \text{Ancho de la cama de secado.}$
-

4.5.2. Metodología para el cálculo de energía que puede brindar el colector Parvati.

Para la obtención de la energía que brinda el colector Parvati se tiene las siguientes fórmulas:

- Para calcular el coeficiente total de pérdidas en el sistema se tiene:

$$U = h_w + h_r \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{Ecuación 11: Coeficiente de Pérdidas}$$

- Para calcular el coeficiente de pérdidas por radiación en el sistema se tiene:

$$h_r = 4\sigma\epsilon T_r^3 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{Ecuación 12: Coeficiente de Perdidas por Radiación}$$

Donde:

- $T_r =$ temperatura de la cámara de secado.
 - $\sigma =$ Coeficiente de Stefan Boltzmann = $5.67 \times 10^8 \frac{W}{m^2 K^4}$
 - $\varepsilon =$ Emisividad de la cámara de secado.
- Para calcular el coeficiente de pérdidas por transferencia de calor del viento en el sistema se tiene:

$$h_w = \frac{8,6V^{0,6}}{L^{0,4}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

*Ecuación 13: Coeficiente de Pérdidas
por el Viento*

Donde:

- $V =$ Velocidad del Fluido.
 - $L =$ Longitud del colector.
- Para calcular el coeficiente de pérdidas por convección en el sistema se tiene:

$$h_{fi} = \frac{N_u K}{D} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

*Ecuación 14: Coeficiente de Pérdidas
por Convección*

Donde:

- $N_u =$ Número de Nusselt.
 - $K =$ Coeficiente de Conductividad Térmica del Fluido.
 - $D =$ Diámetro de la cámara de secado.
- Para calcular el Número de Nusselt:

$$N_u = 0,3(R_e)^{0,6}$$

Ecuación 15: Número de Nusselt

Donde:

- $R_e =$ Número de Reynolds.
- Para calcular el Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{Ecuación 16: Número de Reynolds}$$

Donde

- $\rho =$ Densidad del Fluido.
- $V =$ Velocidad del Fluido.
- $\mu =$ Viscosidad Dinámica.
- $D =$ Diámetro de Cámara de Secado.

- Para calcular el factor de pérdidas del colector:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln \frac{D_o}{D_i}}{2K}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación 17: Factor de} \\ \text{Pérdidas del Colector} \end{array}$$

Donde:

- $D_o =$ Diámetro exterior de la cámara de Secado.
- $D_i =$ Diámetro interior de la cámara de Secado.
- $K =$ Coeficiente de Conductividad Térmica de la cámara de secado.
- $U_L =$ Coeficiente de Pérdidas.
- $h_{fi} =$ Coeficiente de Pérdidas por convección.

- Para calcular el Factor de Eliminación de Calor:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_r}{\dot{m} c_p} \right) \right] \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación 18: Factor de} \\ \text{Eliminación de Calor} \end{array}$$

Donde:

- $\dot{m} =$ Flujo másico del fluido.
- $A_r =$ Área de la cámara de secado.
- $U_L =$ Coeficiente de Pérdidas.
- $F' =$ Factor de Pérdidas del Colector.
- $C_p =$ Calor específico del Fluido.

- Para calcular la Energía útil que proporciona el colector:

$$Q_u = F_R[SA_a - A_r U_L(T_i - T_a)] [W] \quad \text{Ecuación 19: Energía Útil}$$

Donde:

- F_R = Factor de Eliminación de Calor.
- S = Irradiancia Directa sobre la superficie.
- A_a = Área del Colector.
- U_L = Coeficiente de Pérdidas.
- A_r = Área de la cámara de secado.
- T_i = Temperatura interna de la cámara de secado
- T_a = Temperatura ambiente.

4.5.3. Metodología para el cálculo de energía requerida para evaporar la humedad en el grano de café.

Para el cálculo se tienen las siguientes fórmulas:

- Para calcular la masa de agua que es necesario evaporar se tiene:

$$M_a = M_p H \quad \text{Ecuación 20: Masa de Agua a Evaporar}$$

Donde:

- M_p = Masa de Grano de Café a Secar
- H = Humedad del grano de café lavado (decimal)

Según un documento publicado por (Roa & Álvarez, 2014) se tienen las fórmulas:

- Para calcular el calor de vaporización del café se tiene:

$$L = (2502,4 - 2,4295\theta)[1 + 1,44408e^{(-21,5011M)}] \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \quad \text{Ecuación 21: Calor de Vaporización Café}$$

Donde:

- θ = Temperatura del café en °C

- $M = \text{Contenido de humedad del café (decimal)}$

- Para calcular el calor específico del café se tiene:

$$C_p = 1,36 + 5,7859M \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

Ecuación 22: Calor

Específico del Café

Donde:

- $M = \text{Contenido de humedad del café (decimal)}$

Del libro de (Cengel & Ghajar, 2011) se tiene las fórmulas básicas de calor latente y sensible:

- Para calcular el calor sensible se tiene:

$$Q_s = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) [kW]$$

Ecuación 23: Calor Sensible

Donde:

- $\dot{m} = \text{Flujo Másico del Fluido.}$
- $C_p = \text{Calor específico del fluido}$
- $T_i = \text{Temperatura final}$
- $T_a = \text{Temperatura inicial}$

- Para calcular el calor latente se tiene:

$$Q_L = \dot{m}L [kW]$$

Ecuación 24: Calor Latente

Donde:

- $L = \text{Calor Latente de Vaporización.}$
- $\dot{m} = \text{Flujo Másico del Fluido.}$

- Para calcular el calor total se tiene:

$$Q_T = Q_s + Q_L [kW]$$

Ecuación 25: Calor Total

4.5.4. Metodología para calcular el rendimiento del secador solar de café

La fórmula para calcular el rendimiento de un colector solar parabólico tomado de (S. A.

Kalogirou, 2014), se tiene:

$$\eta_{\text{sec}} = \frac{Q_T}{Q_u} \quad \text{Ecuación 26: Rendimiento del Secador}$$

Donde:

- Q_T = Energía requerida para reducir la humedad de café.
- Q_u = Energía que brinda el secador solar.

Para el cálculo de las mismas se tienen las ecuaciones 19 y 25. En donde se involucran diferentes parámetros, los cuales permiten obtener resultados confiables.

4.6. Metodología para medir el contenido de humedad de café pergamino.

El método propuesto por Olivera denominado Gravimet (Ilustración 13) se basa en determinar la humedad del café en base al peso de una muestra del mismo. (Jurado et al., 2009)

Para realizar el método se debe seguir el siguiente proceso:

- Tomar una muestra de 200 g de café pergamino sano y limpio sin presencia de flotes, granos muy brocados, granos con pulpa adherida, frutos secos y pulpa y escurrido durante una hora.
- Colocar la muestra en una canastilla de plástico con una capa máxima de café de 2 cm de espesor.
- La muestra de 200 g se deposita en una canastilla de 12 cm x 12 cm x 5 cm, construida en malla plástica.
- La malla se coloca en el medio de la cama de secado.
- Registrar la evolución del peso utilizando una balanza digital
- La muestra de café debe ser de 5 Kg en una capa de 2 cm de espesor.

Cuando el peso del café se encuentre en 104.5 g la humedad debería estar entre 10 % y 12 % (b.h).

En el estudio realizado por Olivera los resultados mostraron que el método Gravimet no sobrestima ni subestima la humedad. Para el estudio realizado en 2006 a 30 muestras de café se obtuvo café con una humedad promedio del 11.3 %.

Para la obtención del porcentaje de humedad se utiliza la siguiente fórmula:

$$Chf = \left[1 - \frac{Pi(1-Chi)}{Pf} \right] 100$$

*Ecuación 27: Porcentaje de
Humedad*

Donde:

- Pi = masa inicial del café, g.
- Chi = Contenido inicial de humedad % (53 % constante).
- Pf = masa final, g.
- Chf = Contenido final de humedad estimada % b. h con el método Gravimet



Ilustración 13: Método Gravimet. Fuente.

4.7. Control de Secadores de Café.

En el presente proyecto se tiene previsto controlar la temperatura para obtener un proceso de secado óptimo, para lograr esto se debe usar elementos que permitan obtener la magnitud mencionada y ejecutar acciones según el valor obtenido. Para comandar todo este proceso existen dispositivos llamados autómatas programables y microcontroladores entre los cuales se encuentran Arduino, PLC, Raspberry pi, Thunderboard Sense, entre otros.

Para el proyecto se usarán el siguiente microcontrolador:

4.7.1. Arduino

Arduino es una placa de circuito impreso que contiene un microcontrolador reprogramable y varios pines en los cuales es posible conectar sensores o actuadores.

Existen varios modelos de placas Arduino como: Arduino Uno, Mega, Nano, Pro. Sin embargo, todas las placas poseen el mismo microcontrolador tipo AVR, una arquitectura de microcontroladores desarrollada y fabricada por la marca Atmel.

4.7.2. Lenguaje Arduino

A continuación, se presenta un recopilado de las instrucciones más importantes, necesarias para poder realizar una correcta programación.

El lenguaje propio del programa Arduino está basado en el lenguaje C++.

Un programa diseñado para funcionar en Arduino básicamente se compone de tres secciones:

- **La sección de declaraciones de variables globales.**

Está ubicada directamente al principio del programa. Al final de todas las variables hay que colocar punto y coma.

- **La sección llamada "void setup()**

Está delimitada por llaves de apertura y cierre y se ejecutan una única vez, en el momento de encender o resetear la placa Arduino.

- **La sección llamada "void loop()**

Está delimitada por llaves de apertura y cierre y se ejecutan justo después de las de la sección "void setup()" infinitas veces hasta que la placa se apague o se resetee.

- **Variables**

La primera línea del programa consiste en declarar una variable global de tipo "int" cuya sintaxis es "int variable = valor".

Las variables pueden ser:

- **Variable Global:** Para que una variable sea global se debe declarar al principio del programa; antes de las secciones "void setup()" y "void loop()".
- **Variable Local:** Para que una variable sea local se debe declarar en el interior de alguna de las secciones del programa.
- **Tipos posibles de una variable**

Cuando se declara una variable es necesario especificar su tipo. El tipo de variable se coloca según el tipo de datos que se quiere almacenar en la variable, estas pueden ser números enteros, números decimales, cadena de caracteres, etc.

- ✓ **Boolean:** las variables de este tipo solo pueden tener dos valores: cierto o falso. Se utilizan para almacenar un estado de entre esos dos posibles, y así hacer que el programa reaccione según detecte en ellas uno u otro. Para asignar el valor de cierto se utiliza la palabra "true" o bien el valor "1", y para asignarle el valor de falso se puede utilizar "false" o bien el valor "0".
- ✓ **Char:** el valor que puede tener una variable de este tipo es siempre un solo carácter una letra, un dígito, un signo de puntuación, etc.

- ✓ **Byte:** el valor que puede tener una variable de este tipo es siempre un número entero entre 0 y 255 y no pueden ser negativos.
- ✓ **Int:** el valor que puede tener una variable de este tipo es un número entero entre -32768 (-215) y 32767 (215-1), gracias a que utilizan 2 bytes (16 bits) de memoria para almacenarse.
- ✓ **Float:** el valor que puede tener una variable de este tipo es un número decimal. Los valores “float” posibles pueden ir desde el número $-3,4028235 \times 10^{38}$ hasta el número $3,4028235 \times 10^{38}$.
- ✓ **Double:** Es un sinónimo exactamente equivalente del tipo “float”, y por tanto, no aporta ningún aumento de precisión respecto a este. Tanto una variable de tipo “double” como una de tipo “float” ocupan cuatro bytes de memoria.
- ✓ **Array:** este tipo de datos en realidad no existe como tal. Lo que existen son arrays de variables de tipo “boolean”, arrays de variables de tipo “int”, arrays de variables de tipo “float”, etc.

- Bloques Condicionales

- **Los bloques “if” y “if/else”**

Un bloque “if” sirve para comprobar si una condición determinada es cierta o falsa. Si la condición es cierta, se ejecutarán las instrucciones escritas en su interior. Si no se cumple, puede no pasar nada, o bien, si existe tras el bloque “if” un bloque “else”, se ejecutarán las instrucciones escritas en el interior de ese bloque “else”.

- Bloques Repetitivos

- **While:** es un bloque que implementa un bucle; es decir, repite la ejecución de las instrucciones que están dentro de sus llaves de apertura y cierre.
- **Do:** El bucle “do” funciona exactamente igual que el bucle “while”, con la excepción de que la condición es evaluada después de ejecutar las instrucciones escritas dentro de las

llaves. Esto hace que las instrucciones siempre sean ejecutadas como mínimo una vez aun cuando la condición sea falsa, porque antes de llegar a comprobar esta, las instrucciones ya han sido leídas.

- **For:** La diferencia entre un bucle “while”, “for” y un bucle “for” está en que en el primero el número de iteraciones realizadas depende del estado de la condición definida, pero en un bucle “for” el número de iteraciones se puede fijar a un valor exacto. Por tanto, se usará el bucle “for” para ejecutar un conjunto de instrucciones un número concreto de veces.

4.7.3. Sensores.

Para el presente proyecto se usan sensores de temperatura y humedad, a continuación, se describen algunos de los cuales algunos de los mismos se usarán en el proyecto de tesis:

4.7.3.1. Sensores de Temperatura

En el proceso de secado del café es de suma importancia tener el control de la temperatura puesto que para que pueda obtenerse un café de excelente calidad se requiere que el secado se realice a 25 °C a 35 °C según datos proporcionados por la normativa presentada por (Diaz, 2014), para realizar esto es indispensable que sistema de control conste de un sensor de temperatura:

Existe diversos tipos de sensores térmicos, entre los más conocidos se encuentran:

- **Termopares**

También llamados Termocuplas (Ilustración 14) son sensores que consisten en la aparición de voltaje entre dos piezas de distintos metales unidas o soldadas por un extremo, cuando estos se calientan (unión caliente) y se mantiene los otros extremos a una misma temperatura inferior también llamada unión fría.



Ilustración 14: Termocupla Tipo K. Fuente (Electronics, 2019)

Entre las termocuplas más utilizados tanto a nivel industrial como doméstico se tienen las termocuplas Tipo J, K entre otras.

La termocupla tipo K, posee las siguientes características:

- Voltaje de Operación: 5 V
- Corriente de trabajo: 50 mA
- Rango de Temperaturas Termocupla: -200 °C hasta 1300 °C
- Resolución Transmisor MAX6675: 12 bits (0 °C – 1023 °C)
- Resolución de temperatura: 0.25 °C
- Modo de salida: SPI
- Dimensiones: 25 mm * 15 mm * 13 mm
- Longitud cable: 200 cm
- **Termorresistencias Pt100**

Los conductores eléctricos presentan, en general, un aumento de resistencia con la temperatura.

Aprovechando esta propiedad, se construyen sondas de temperatura, pero para ello se requiere un material cuyo coeficiente se mantenga relativamente constante y que dé una buena sensibilidad. Las sondas industriales se suelen construir a base de platino. Dichas sondas suelen tener un valor nominal de 100 °C a 0 °C, de donde se deriva el nombre de Pt100.

Las sondas Pt100 (Ilustración 15) son aptas como sensores para un amplio margen de temperaturas que va desde -250 °C hasta 850 °C. con una muy buena linealidad entre -200 °C y 500 °C.



Ilustración 15: Termorresistencia Pt100 (ElectroCrea, 2018)

- **Termistores**

Un termistor es un sensor que actúa modificando su resistencia dependiendo de la temperatura a la que este expuesto. Están contruidos de forma que la resistencia cambia drásticamente lo que permite que la precisión al variar la resistencia y temperatura es bastante exacta.

Existen dos tipos de termistores, los llamados NTC en los cuales a medida que la temperatura aumenta decrece su resistencia y en los PTC se caracterizan porque a medida que la temperatura aumenta la resistencia aumenta.

Entre los termistores que se puede nombrar están:

- ✓ **Sensor LM35**

El sensor LM35 (Ilustración 16) posee una precisión calibrada de 1 °C. Su salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10 mV. El rango de medición de temperatura del sensor va desde -55 °C hasta 150 °C.

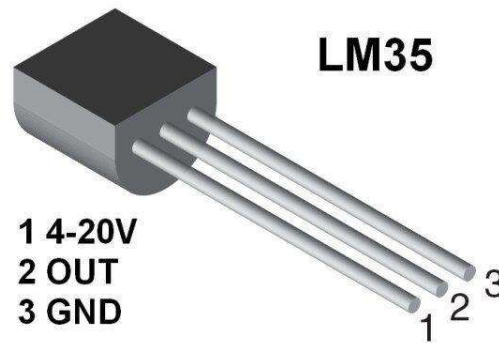


Ilustración 16: Sensor LM35 y Conexión. Fuente (Isaac, 2018)

4.7.3.2. Sensores de Humedad

Los sensores de humedad se aplican para detectar el nivel de líquido en un depósito, o en sistemas de riego de jardines para detectar cuándo las plantas necesitan riego y cuándo no.

Permiten medir la temperatura de punto de rocío, humedad absoluta y relación de mezcla.

Un conocido sensor de humedad en el mundo de la electrónica es:

✓ Sensor DHT22

El DHT22 (Ilustración 17) es un sensor digital de temperatura y humedad relativa, integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más.

Sus características principales son:

- **Precisión de medición de Temperatura:** 0,5 °C
- **Rango de Medición de Temperatura:** -40 °C – 80 °C
- **Precisión de medición de Humedad:** 2 % RH
- **Rango de Medición de Humedad:** 0 – 100 % RH
- **Voltaje de alimentación:** 3 V a 6 V DC
- **Tipo de Alimentación:** Salida Digital
- **Pines que contiene:** GND, VCC y DATA, NC
- **Tiempo de sensado:** 2 s
- **Consumo de Corriente:** 1.1 mA
- **Dimensiones:** 20 mm x15 mm x8 mm

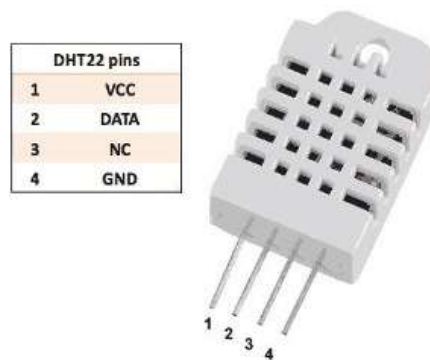


Ilustración 17: Sensor DHT22 y Conexionado. Fuente(Mechatronics, 2018)7

✓ **Sensor DHT11**

El DHT11 (Ilustración 18) es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo y fácil uso. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos. Utilizado en aplicaciones académicas relacionadas al control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más.

Sus características principales son:

- **Precisión de medición de Temperatura:** 2 °C
- **Rango de Medición de Temperatura:** 0 °C – 50 °C
- **Precisión de medición de Humedad:** 5 % RH
- **Rango de Medición de Humedad:** 20 % – 90 % RH
- **Voltaje de alimentación:** 3 V a 5 V DC
- **Tipo de Alimentación:** Salida Digital
- **Pines que contiene:** GND, VCC y DATA, NC
- **Tiempo de sensado:** 1 s
- **Dimensiones:** 16 mm x 12 mm x 5 mm

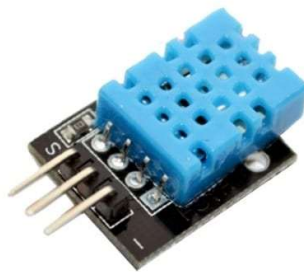


Ilustración 18: Sensor DHT11. Fuente(Mechatronics, 2018)

4.7.4. Actuadores

4.7.4.1. Actuadores Lineales

Para el presente proyecto se usará un Actuador Lineal mecánico (Ilustración 19) en lugar de un Actuador neumático puesto que no es necesaria una alta velocidad de salida o entrada.

Los actuadores lineales son aquellos en los cuales su motor es de inducción y que en lugar de realizar un movimiento de rotación este realiza un movimiento de traslación, algunas de las ventajas que poseen dichos motores son el tipo de construcción simple y robusta que los caracteriza, además no se requiere gastar demasiado dinero en su mantenimiento.



Ilustración 19: Actuador Lineal Eléctrico. Fuente(Iturralde, 2019)

4.7.5. Relés o Relays

Un relé (Ilustración 20) es un interruptor que podemos activar mediante una señal eléctrica. En su versión más simple es un pequeño electro-imán que cuando lo excitamos mueve la posición de un contacto eléctrico de conectado a desconectado o viceversa.

El símbolo del relé muestra la bobina y en este caso, un accionador que conmuta entre dos contactos, pero también existen relés de múltiples contactos. Mediante una señal de control de poca intensidad que excite la bobina podemos conmutar grandes tensiones o intensidades.(Prometec, 2017)

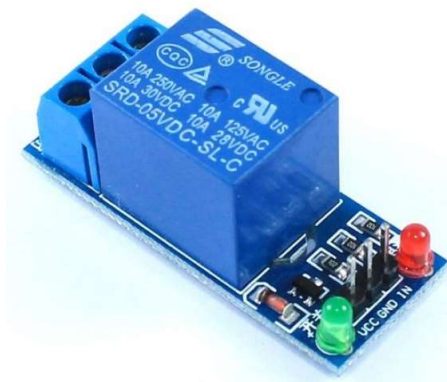


Ilustración 20: Relé 5 v. Fuente(Prometec, 2017)

4.7.6. Celda de Carga.

Una celda de carga (Ilustración 21) es un transductor capaz de convertir una fuerza en una señal eléctrica, esto la hace a través uno o más galgas internas que posee, configuradas en un puente Wheatstone.(Naylampmechatronics, 2015)



Ilustración 21: Celda de Carga. Fuente(Naylampmechatronics, 2015)

La siguiente figura (Ilustración 22) muestra un ejemplo de cómo instalar la celda de carga:



Ilustración 22: Instalación celda de Carga. Fuente(Naylampmechatronics, 2015)

4.7.7. Ventiladores

Un ventilador es una máquina que convierte la energía mecánica en energía de fluido, obteniendo una presión que mantiene el flujo continuo de aire.

Entre los ventiladores más comunes existen dos tipos de ventiladores:

- **Centrífugos:** Se caracterizan (Ilustración 23) por realizar la aspiración por el centro y la expulsión a través de sus álabes.



Ilustración 23: Ventiladores Centrífugos. Fuente(SolerPalau, 2015b)

- **Axiales:** Son apropiados (Ilustración 24) cuando se requiere mucho caudal de aire con una relativa baja presión.



Ilustración 24: Ventiladores Axiales. Fuente(SolerPalau, 2015a)

La elección de los ventiladores se da de acuerdo a la presión requerida, el flujo volumétrico, entre otros.

Una vez conocidos los tipos de ventiladores mas comunes, se realiza el cálculo del flujo de aire necesario para realizar el proceso de secado de forma correcta.

4.7.7.1. Metodología para el Diseño y Selección de Ventiladores

Para realizar el cálculo de ventiladores para mantener un flujo masico de aire se tiene:

- Para calcular el caudal de ventilación necesario, según (GUTIERREZ et al., 2012) se recomienda usar el valor de caudal específico (q_0).

$$Q = q_0 m_{cps} = 0,1 \frac{m^3}{min kg_{cps}} m_{cps}$$

Ecuación 28: Cálculo de Caudal de Ventilación

Donde:

- m_{cps} = Masa del Café a secar.
- q_0 = Caudal Específico

Para realizar el cálculo del caudal de aire necesario para disminuir la temperatura en el café se tiene:

- Para calcular el calor específico del café se tiene la Ecuación 20:

$$C_p = 1,36 + 5,7859CH \left[\frac{kJ}{KgK} \right]$$

Ecuación 29: Calor Específico del Café

Donde:

- CH = Contenido de humedad del café (decimal)
- Para calcular el calor necesario para disminuir la temperatura en el café se tiene:

$$\dot{q} = \frac{m_{cps} C_{p,café} (T_{f,a} - T_{i,a})}{t}$$

*Ecuación 30: Calor de
reducción de Temperatura*

Donde:

- m_{cps} = Masa del Café a secar.
- $C_{p,a}$ = Calor Específico del Aire.
- $T_{f,a}$ = Temperatura final del aire.
- $T_{i,a}$ = Temperatura inicial del aire.
- t = Tiempo de reducción de temperatura.

- Para calcular el flujo másico de aire se tiene:

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}}{C_{p,a} (T_{f,a} - T_{i,a})}$$

*Ecuación 31: Flujo Másico
de Aire*

Donde:

- $C_{p,a}$ = Calor Específico del Aire.
- $T_{f,a}$ = Temperatura final del aire.
- $T_{i,a}$ = Temperatura inicial del aire.
- \dot{q} = Calor de Café para la disminución de temperatura.

4.8. Revisión de Proyectos previos de Secadores de Café.

A continuación, se muestran diversos proyectos relacionados con los secadores de café:

4.8.1. Proyecto 1

El proyecto denominado “Efectividad de un Proceso de Secado de Café usando Secadores Solares con Sistema de Flujo de Aire Continuo Impulsado por Energía Fotovoltaica (Ilustración 25), en la Región San Martín, Perú” tiene como objetivo reducir los tiempos de secado de café para poder cumplir esto se usaron módulos secadores solares combinados con un sistema de flujo de aire impulsado por energía fotovoltaica.

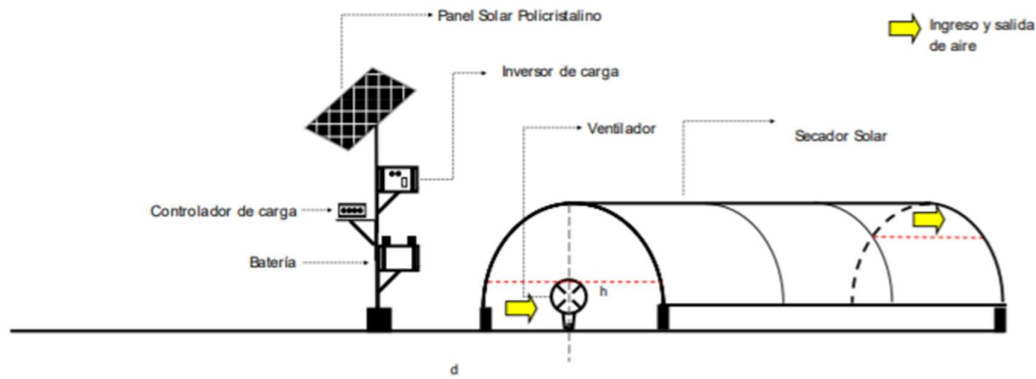


Fig. 1: Modelo de prototipo desarrollado

Ilustración 25: Secado de Café impulsado por energía fotovoltaica. Fuente (Prada et al., 2019)

Para el proyecto se usó un secado solar tipo invernadero de 4m x 8m con nueve mediciones por día, se obtuvo una humedad final del 12% al cabo de 5 días de secado. Las temperaturas a las que fue sometido el café durante el proceso del secado fueron de 42, 46 y 49°C en un intervalo de tiempo de 6 a 8h por día, al finalizar la etapa de experimentación se obtuvo un rendimiento del 15%.

4.8.2. Proyecto 2

En el artículo publicado en 2009 cuyo tema es “Hacia la mejora del secado mecánico del café” en el cual se realiza el estudio de el secado de café mecánico (Ilustración 26) en Colombia. El secado mecánico consiste en usar fuentes externas para aumentar la temperatura del aire en el interior de la cámara de secado hasta aproximadamente 50°C impulsado generalmente por un ventilador centrífugo, El proceso de secado mecánico se lo realiza generalmente en un tiempo de 18 a 30 horas.

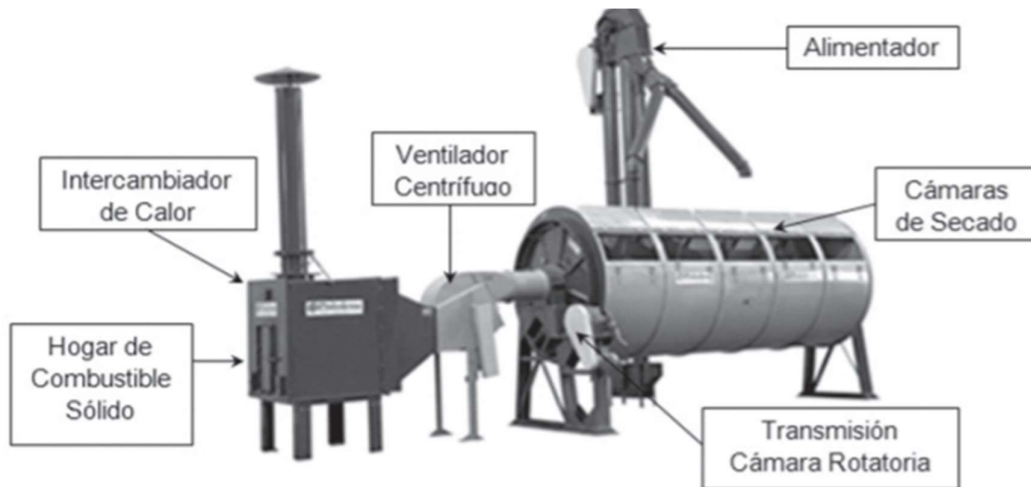


Ilustración 26: Secador mecánico de café. Fuente (Gutiérrez-Flórez & Copete-López, 2009)

4.9. Fundamentos de la Transferencia de Calor

A continuación, se presentan varios conceptos fundamentales concernientes a la rama de la transferencia de calor que permitirán comprender los fenómenos que intervienen durante el proceso de secado de café.

4.9.1. Antecedentes

A lo largo de la historia el fuego ha sido uno de elementos más importantes en el desarrollo en todos los aspectos sociales, en el siglo 18 a el calor se lo denominaba calorífico y se creía que era una sustancia que fluía a través del espacio.

Debido a las diferentes teorías que aparecían sobre el hoy conocido calor se iniciaron múltiples investigaciones que permitieron conocer todos sus aspectos y los diferentes usos que se le puede dar.

4.9.2. Termodinámica

La palabra termodinámica proviene de los términos griegos therme que significa calor y dynamis fuerza. Es difícil definirla de forma precisa sin embargo es posible decir que la

termodinámica es la ciencia que se encarga del estudio de las transformaciones de la energía que se dan al existir transferencia de calor en el paso de un estado a otro en un sistema.

4.9.3. Calor

Se puede definir a el calor como la energía que se encuentra en movimiento desde un cuerpo a otro por la acción de la diferencia de temperatura existente. Este movimiento de energía se puede en forma de radiación o conducción.

4.9.3.1. Conducción

La conducción es la forma de transferencia de calor que consiste en la transferencia de energía desde partículas más energéticas u otras menos energéticas que tiene lugar en los sólidos, líquidos y gases.

4.9.3.2. Convección

La convección constituye el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido, en presencia de un movimiento masivo de éste.

La convección puede ser natural en el caso en el cual el movimiento del fluido es causado por medios naturales y forzada en el caso en el que el movimiento del fluido es causado por medios externos como un ventilador, bomba.

4.9.3.3. Radiación

A diferencia de los mecanismos de transformación de calor mencionados anteriormente, la radiación es un mecanismo que no requiere de un medio material para llevarse a cabo. Además de esto la transferencia por radiación es la más rápida (velocidad de la luz) y puede ocurrir en sólidos líquidos y gases.

Tipos de Radiación

- **Radiación Solar**

El sol es la principal fuente de energía en el mundo, la energía proveniente de él se la llama energía solar, llega a nuestro planeta en forma de ondas electromagnéticas luego de sufrir varias interacciones con la atmósfera.

La energía de radiación emitida por los constituyentes de la atmósfera forma la radiación atmosférica. La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama irradiancia solar total (Ilustración 27) G_s , cuyo valor es $G_s = 1373 \text{ W/m}^2$.

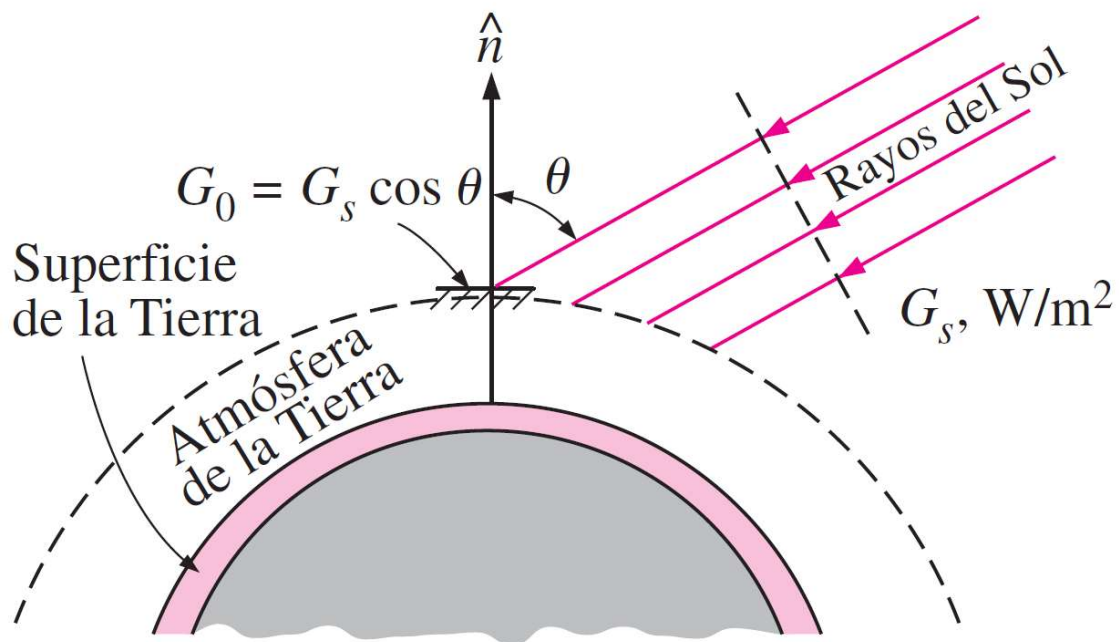


Ilustración 27: Radiación Solar. Fuente (Cengel & Ghajar, 2011)

La energía solar que llega directamente consta de dos partes la directa y difusa (Ilustración 28).

Entonces, la energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal sobre el piso es:

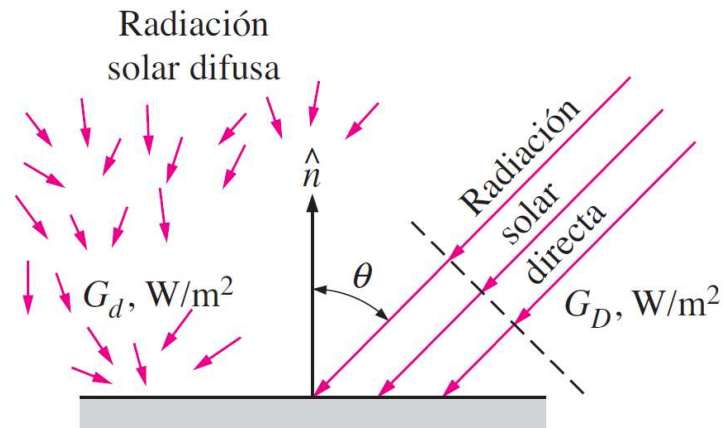


Ilustración 28: Tipos de Radiación Solar. Fuente (Cengel & Ghajar, 2011).

4.10. Energía Solar

Es necesario decir que la energía solar de forma directa o indirecta es el origen de la mayoría de las energías renovables y llega a la superficie terrestre en forma de radiación electromagnética. La energía del sol luego de pasar por la atmósfera pierde aproximadamente el 50% de su intensidad que es aprovechable para generación.

Tipos de Radiación Solar

La radiación solar llega a nuestro planeta de dos formas distintas:

- Radiación directa

La radiación directa es aquella que llega directamente desde el sol sin haberse desviado ni cambiado de dirección, también es aquella que produce las sombras y es predominante en un día soleado.

▪ Metodología de Hottel para el cálculo de la Radiación en un día claro.

Es un método para calcular la radiación solar directa emitida a través de la atmósfera en un día claro, en el mismo se toman en cuenta diferentes aspectos relacionados a la geometría solar terrestre tales como el ángulo cenital solar y la altitud para una atmósfera estándar y

se puede calcular para cuatro tipos de clima: tropical, verano en latitudes medias, verano subártico e invierno en latitud media.(Duffie et al., 1985)

A continuación, se muestran los diferentes parámetros a calcular:

- Para calcular el coeficiente de transmitancia para la radiación solar directa τ_b se tiene:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left[\frac{-k}{\cos \theta_Z}\right] \quad \text{Ecuación 32: Coeficiente de Transmitancia } R_b$$

Donde:

- $\tau_b =$ Coeficiente de Transmitancia.
- $a_0, a_1, k =$ Constantes.
- $\theta_Z =$ Ángulo Cenital.

- Para el cálculo de las constantes a_0, a_1, k se tiene:

$$a_0 = r_0[0,4237 - 0,00821(6 - A)^2] \quad \text{Ecuación 33: Constante de Corrección 1}$$

$$a_1 = r_1[0,5055 + 0,00595(6,5 - A)^2] \quad \text{Ecuación 34: Constante de Corrección 2}$$

$$k = r_k[0,2711 - 0,01825(2,5 - A)^2] \quad \text{Ecuación 35: Constante de Corrección 3}$$

Donde:

- $A =$ Altura sobre el nivel del mar en km.
- r_0, r_1 y $r_K =$ Factores de Corrección.

En la (Tabla 1) se muestran los factores de corrección a tomar de r_0, r_1 y r_K para los diferentes tipos de clima.

Tabla 1: Factores de Corrección.

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Verano latitud media	0,97	0,99	1,02
Verano sub-ártico	0,99	0,99	1,01

Invierno latitud media	1,03	1,01	1,00
------------------------	------	------	------

Fuente (Duffie et al., 1985)

- Para el cálculo del ángulo cenital θ_z se tiene:

$$\cos\theta_z = (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)) + (\sin(\phi) \sin(\delta)) \quad \text{Ecuación 36: Ángulo Cenital}$$

Donde:

- $\delta = \text{Declinación Solar}$.
- $\omega = \text{Ángulo Horario}$.
- $\phi = \text{Latitud}$.
- $\theta_z = \text{Ángulo Cenital}$.

En la (Tabla 2) se muestran los valores del ángulo horario en función de la hora del día.

Tabla 2: Ángulo horario en función de la hora.

Ángulo Horario	Hora del Día	
ω	h	
75	6-7 h	17-18 h
60	7-8 h	16-17 h
45	8-9 h	15-16 h
30	9-10 h	14-15 h
15	10-11 h	13-14 h
0	11-12 h	12-13 h

Fuente (Autor)

- Para el cálculo de la declinación solar δ se tiene:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(2\pi \frac{(284+n)}{365}\right) \quad \text{Ecuación 37: Declinación Solar}$$

Donde:

- $n = \text{Número del día según la fecha del año.}$

En la (Tabla 3) se muestran los valores para calcular W dependiendo de los días del año.

Tabla 3: Número del día.

Mes	Número de día del mes
Enero	i
Febrero	31+i
Marzo	59+i
Abril	90+i
Mayo	120+i
Junio	151+i
Julio	181+i
Agosto	212+i
Septiembre	243+i
Octubre	273+i
Noviembre	304+i
Diciembre	334+i

Fuente (Duffie et al., 1985)

- Para calcular la radiación solar extraterrestre G_{on} se tiene:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right) \quad \text{Ecuación 38: Radiación Solar Extraterrestre}$$

Donde:

- $G_{on} = \text{Radiación Solar Extraterrestre.}$
 - $G_{sc} = \text{Constante Solar} = 1367 \frac{W}{m^2}$
 - $n = \text{Número del día según la fecha del año.}$
- Para calcular la radiación solar directa G_{dir} se tiene:

$$G_{dir} = \tau_b G_{on} \cos \theta_Z \quad \text{Ecuación 39: Radiación Solar Directa}$$

Donde:

- G_{dir} = Radiación Solar Directa.
- G_{on} = Radiación Solar Extraterrestre.
- τ_b = Coeficiente de Transmitancia.
- θ_Z = Ángulo Cenital.

- **Radiación difusa**

Es la radiación que llega a la superficie terrestre luego de haber pasado por los elementos que conforman la atmósfera como polvo, nubes, contaminantes, etc. Por lo mencionado anteriormente la radiación cambiará de dirección.

Para calcular la radiación difusa, se tiene el método de día claro de hotel, a continuación, se presentan las fórmulas correspondientes:

- Para calcular el coeficiente de transmitancia para la radiación solar difusa se tiene:

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_b \quad \text{Ecuación 40: Coeficiente de Transmitancia Rd}$$

Donde:

- τ_d = Coeficiente de transmitancia para la radiación difusa.
- τ_b = Coeficiente de Transmitancia de la radiación solar directa.

- Para calcular la radiación solar difusa se tiene:

$$G_{dif} = \tau_d G_{on} \cos \theta_Z \quad \text{Ecuación 41: Radiación Solar Difusa}$$

Donde:

- G_{dif} = Radiación Solar Difusa.
- G_{on} = Radiación Solar Extraterrestre.
- τ_d = Coeficiente de Transmitancia de la radiación difusa.
- θ_Z = Ángulo Cenital.

La radiación global: es la suma de la radiación directa y la radiación difusa.

Para realizar la medición de la radiación solar, en el proyecto se usará un piranómetro digital:

- **Piranómetro Digital:** Medidor de radiación SM206 ® (Ilustración 29) puede ser utilizado en la medición de la radiación directa, Solar.



Ilustración 29: Piranómetro Digital. Fuente(Amazon, 2012)

4.10.1. Radiación Solar en la Ciudad de Loja

- Según datos proporcionados en el portal web de National Aeronautics and Space Administration (NASA) utilizando un algoritmo de predicción se proporcionan datos en donde se muestra la cantidad de irradiancia que cae sobre la ciudad de Loja.

Se toman datos que muestran la cantidad de radiación (Tabla 4) que cae en la ciudad de Loja en invierno, porque al colector solar se debe dimensionar en la estación meteorológica en la que exista la menor cantidad de radiación directa:

Tabla 4: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.

Irradiación en la Ciudad de Loja			
Estación del Año	Radiación Directa	Radiación Difusa	Radiación Global
	Promedio	Promedio	Promedio
	W/m ²	W/m ²	W/m ²

Verano	695,2	92,4	787,6
Invierno	670,1	94,65	764,75
Vera e Invie	685	87,16	772,16

Fuente(NASA, 2018)

- Según el Atlas Solar con fines de generación eléctrica publicado por (CONELEC Consejo Nacional de Electricidad, 2008), los niveles de radiación promedio por cada mes (Tabla 5) en la provincia de Loja se muestran en la siguiente tabla:

- Tabla 5: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.

Meses del Año	Nivel de Radiación Solar (Wh/m ² /día)	Meses del Año	Nivel de Radiación Solar (Wh/m ² /día)
Enero	4750	Julio	4575
Febrero	4925	Agosto	5100
Marzo	4575	Septiembre	5275
Abril	4050	Octubre	5450
Mayo	4275	Noviembre	5450
Junio	4400	Diciembre	5275
Promedio Anual		4841,67	

Fuente(CONELEC, 2008)

Con un total de 12 horas solares se obtiene la radiación por metro cuadrado (Tabla 6):

Tabla 6: Irradiación Solar en la Ciudad de Loja.

Meses del Año	Nivel de Radiación Solar (Wh/m ² /día)	Nivel de Radiación Solar (W/m ²)
Enero	4750	593,8
Febrero	4925	615,6
Marzo	4575	571,9
Abril	4050	506,3
Mayo	4275	534,4
Junio	4400	550,0
Julio	4575	571,9

Agosto	5100	637,5
Septiembre	5275	659,4
Octubre	5450	681,3
Noviembre	5450	681,3
Diciembre	5275	659,4
Promedio Anual	4841,67	605,2

Fuente(CONELEC, 2008)

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

➤ Materiales utilizados para la construcción de la Cámara de Secado

- Tubo Cuadrado de 5/8" x 1.2 mm (Norma: SAE J 403 1008)
- Pernos 1/8" Acero Negro
- Angulo de 25 mm x 2 mm (Norma: SAE J 403 1008)
- Plástico de Invernadero

➤ Materiales utilizados para la construcción de la Estructura Parvati

- Tubo Cuadrado de 3/4"x1.5 mm (Norma: SAE J 403 1008)
- Plancha de Acero Inoxidable de 1.22 m x 2.44 m (Norma: AISI 304)
- Electrodo 6011 y 6013
- Pernos de 1/4" Acero Negro

➤ Materiales utilizados para la construcción de la Estructura de Soporte

- Tubo Cuadrado de 3/4 x 1.5 mm (Norma: SAE J 403 1008)
- Electrodo 6011 y 6013
- Platina 30 mm x 30 mm x 3 mm
- Pernos de 1/4" Acero Negro
- Polea de 2" de Hierro
- Cable de Acero de 5/32"

➤ Materiales utilizados para implementar el Control y Monitoreo

- Controlador Arduino Mega
- Termocupla tipo K

- Actuador Lineal
- Ventiladores DC
- Ventilador COMMONWEALTH
- Sensor de Humedad DHT22
- Sensor de Humedad DHT11
- Relé de Contactos
- Celda de Carga
- Piranómetro SM206
- Medidor de Humedad de Granos G-7 Grain Moisture Meter
- Cautín 40W
- Pinza Amperimétrica UNIT 202A
- Cable 2x16AWG

➤ **Materiales de Oficina**

- Computadora
- Paquete de Microsoft Office
- Software de Diseño
- Software de Simulación
- IDE Arduino
- Impresora

5.2. Métodos

Para poder dar cumplimiento a los diferentes objetivos se sigue el siguiente proceso metodológico:

1. Se propone una masa de café de 25kg para experimentar en el proceso de secado.

2. Se realiza una revisión bibliográfica sobre los parámetros de secado poniendo principal atención a la temperatura y humedad para asegurar un secado que permita obtener café de calidad.
3. Se propone la geometría Parvati basada en la geometría de la parábola
4. Se obtiene el formulado matemático para poder generar la geometría del colector Parvati, tomando en cuenta aspectos tales como los ángulos de las superficies reflectantes, longitud foca, entre otros aspectos.
5. Se calcula las dimensiones de la cámara de secado para que contenga los 25kg de café.
6. Se dimensiona la estructura Parvati acorde a la cámara de secado propuesta.
7. Se establece un sistema de medición de humedad del café.
8. Se diseña el sistema de control de temperatura conformado por sensor de temperatura y humedad que irán dentro y fuera de la cámara de secado, así también se diseña un sistema automático de adquisición de datos a través del microcontrolador Arduino.
9. Se realiza la construcción del prototipo de la cámara de secado y estructura Parvati
10. Se somete a pruebas el prototipo y se realiza la obtención de los datos con una frecuencia de 5 min de las siguientes variables: temperatura del café, temperatura y humedad de la cámara de secado, temperatura y humedad del ambiente exterior.
11. El proceso de secado se lo realiza con las siguientes condiciones:
 - Al grano de café lavado se dejará escurrir durante 30 min en un espacio que no esté expuesto al sol.
 - Al colocar el café lavado y escurrido se dejará calentar el café 5° mayor a la temperatura ambiente con el fin de estabilizar el flujo de calor, desde este momento se comenzarán a tomar datos.
 - Los datos se tomaron durante 33 días desde las 10:00 hasta las 16:00 siguiendo la recomendación de secado de café.

- Cuando el café alcanza la temperatura de 30°C la estructura Parvati cambia de posición cerrándose para impedir que las planchas de acero inoxidable sigan reflejando el calor a la cámara de secado.
- En el momento en que el café baja a una temperatura de 26°C la estructura Parvati cambia de posición abriéndose para reflejar nuevamente el calor y aumentar la temperatura.
- En la etapa de pruebas para el sistema de control de temperatura, al alcanzar el café la temperatura de 35°C se encenderá un ventilador extrayendo calor de la cámara de secado. Al retornar la temperatura a 30°C el ventilador se apaga.

12. Se realiza la tabulación y representación gráfica de los datos obtenidos.

6. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. Diseño conceptual del prototipo de secador de café accionado con energía solar térmica.

El diseño del secador de café accionado con energía solar térmica está compuesto por el dimensionamiento de los elementos que conforma tanto la estructura Parvati como la cámara de secado. Para el dimensionamiento del prototipo fue necesario conocer los diferentes parámetros que conforman la estructura Parvati y la cámara de secado.

Para el diseño de la cámara de secado se realizaron los siguientes cálculos:

En primer lugar, con un diámetro de un metro y tomando en cuenta medio quintal de café se calcularon las diferentes medidas del resto de los elementos que conforman la cámara de secado:

Como datos se tiene que la densidad promedio del café es 620 Kg/m^3 y $1/2$ quintal que equivale a 25 Kg , se calculó la longitud de la cámara de secado:

Para calcular el volumen V , con la ecuación (8) se tiene:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

En donde ρ es la densidad del café y m la masa.

$$V = \frac{25 \text{ Kg}}{620 \text{ Kg/m}^3} = 0.04 \text{ m}^3$$

Para calcular el área necesaria, con la ecuación (9) se tiene:

$$A = \frac{V}{h}$$

En donde h es la altura de la cama de secado de 5 cm o 0.05 m :

$$A = \frac{0.04m^3}{0.05m} = 0.81m^2$$

Para calcular la longitud de la cama de secado, con la ecuación (10) se tiene:

$$L = \frac{A}{a}$$

En donde a es el ancho de la cama de 0.9m:

$$L = \frac{0.81m^2}{0.9m} = 0.9m$$

Finalmente se realizó el trazado de la cama de secado (Ilustración 30) y sus diferentes elementos en el software SolidWorks

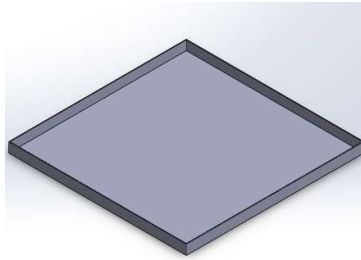


Ilustración 30: Cama de Secado. Fuente (Autor)

Para el diseño de la estructura Parvati a continuación, se muestra un gráfico (Ilustración 31) con la geometría de los dos elementos necesarios:

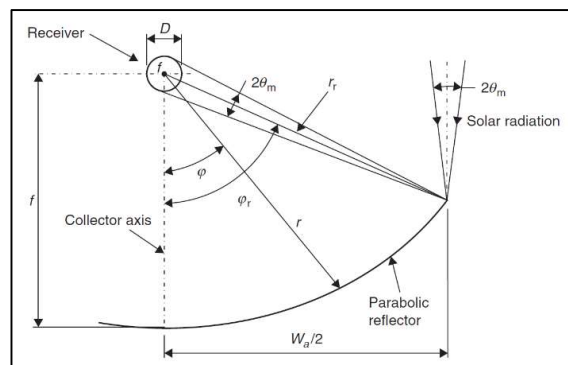


Ilustración 31: Geometría de Parábola. Fuente (Kalogirou, 2014)

En donde se tiene que:

- Wa = Abertura total de la parábola.
- φ_r = ángulo que se forma entre la abertura total con respecto al eje principal de la parábola donde se ubica el foco, o también llamado ángulo de borde.
- r_r = Distancia que se conoce como el radio que describe la abertura total y el foco de la parábola.
- r = Radio de un punto local de la parábola.
- φ = ángulo descrito por un punto local de la parábola.
- f = Longitud focal.

Para el dimensionamiento de la parábola característica que servirá como guía para construir las estructura Parvati es necesario en primer lugar definir φ_r , para esto se usó un estudio realizado por (Riveros & Oliva, 1985) en donde se define gráficamente el efecto que produce la utilización de los ángulos mayores, iguales y menores a 90 grados, a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Para ángulos de borde menores a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 32):

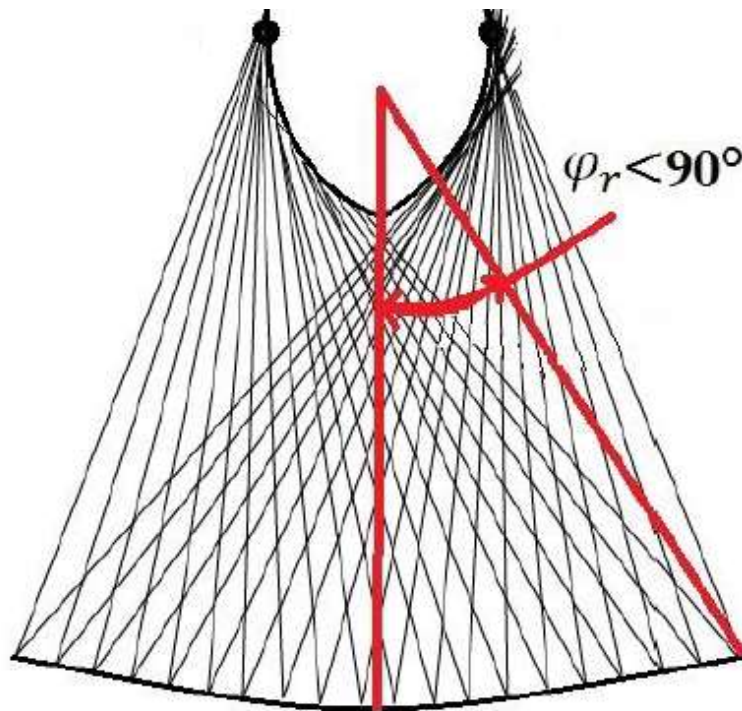


Ilustración 32: Parábola con ángulo de borde menor a 90°. Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

Para ángulos de borde mayores a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 33):

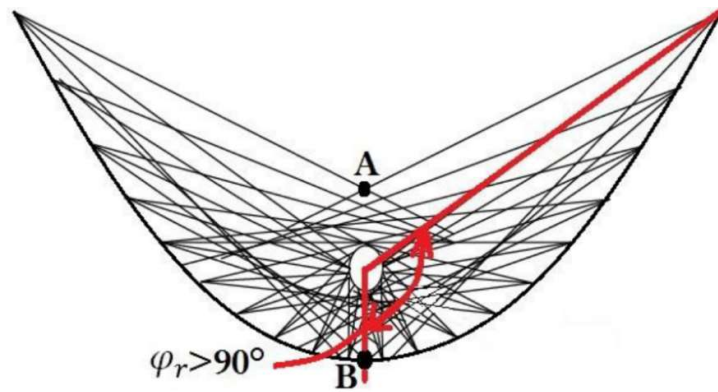


Ilustración 33: Parábola con ángulo de borde mayor a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

Para ángulos de borde iguales a 90° se tiene la gráfica (Ilustración 34):

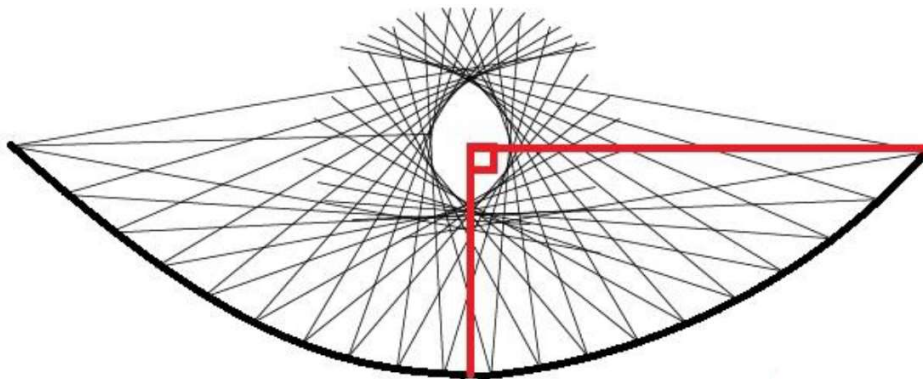


Ilustración 34: Parábola con ángulo de borde igual a 90° . Fuente (Riveros & Oliva, 1985)

En este caso para el diseño del colector se usó un ángulo de borde igual a 90° porque es el que permite obtener el mejor funcionamiento debido a que los rayos solares inciden de forma más ordenada que los otros ángulos y cubre toda el área del colector permitiendo aprovechar toda la energía solar.

También fue necesario definir la abertura de la parábola, para este caso se tomó 5m.

Para obtener las dimensiones de los parámetros restantes se usaron las siguientes fórmulas:

- Para calcular la longitud focal, con la ecuación (1) se tiene:

Con $W_a = 5m$ y $\varphi_r = 90^\circ$.

$$f = \frac{W_a}{4 \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)} = \frac{5m}{4 \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right)} = 1.25m$$

- Para calcular el radio de la parábola, con la ecuación (2) se tiene:

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos(\varphi_r)} = \frac{2(1.25m)}{1 + \cos(90^\circ)} = 2.5m$$

- Para calcular la altura de la parábola, con la ecuación (3) se tiene:

$$Hp = \frac{W_a^2}{16f} = \frac{(5m)^2}{16(1.25m)} = 1.25m$$

- Para calcular la longitud de la parábola, con la ecuación (4) se tiene:

$$S = \frac{Hp}{2} \left\{ \sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \ln \left[\sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \right] \right\}$$

$$S = \frac{1.25m}{2} \left\{ \sec\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) + \ln \left[\sec\left(\frac{90^\circ}{2}\right) + \tan\left(\frac{90^\circ}{2}\right) \right] \right\} = 1.434m$$

- Para calcular el área de apertura, con la ecuación (5) se tiene:

$$Ap = W_a L = (5m)(0.9m) = 4.5m^2$$

- Para calcular el diámetro mínimo del foco, con la ecuación (6) se tiene:

$$d_o = 2r_r \sin \frac{\theta_m}{2} = 2(2.5m) \sin\left(\frac{0.53^\circ}{2}\right) = 0.0231m = 23.1mm$$

Con el resultado obtenido del diámetro se sabe que el elegido de un metro es válido y permite la recepción de toda la energía proporcionada por la estructura Parvati.

Finalmente, se graficó la parábola con la función que se muestra en la ecuación (7) y colocar los diferentes parámetros calculados:

$$y^2 = 4fx$$

Para mostrar gráficamente los resultados se usó un software de diseño, dichos resultados se muestran a continuación (Ilustración 35):

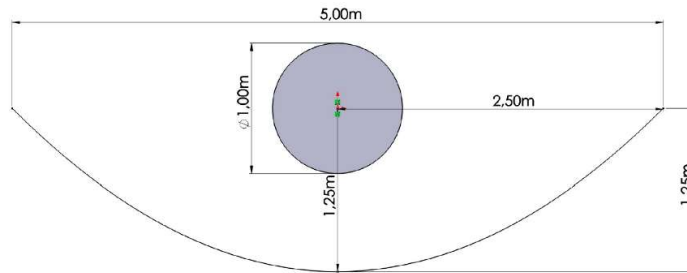


Ilustración 35: Dimensiones Parábola. Fuente (Autor)

Puesto que fue necesario diseñar una estructura Parvati o de doble ángulo basada en el método de la parábola, se realizó el cálculo del radio para colocar cada placa de reflexión.

Se eligieron los ángulos de borde de 51° y 81° , con estos se calculan los radios respectivos como se muestra a continuación:

$$r_{r1} = \frac{2f}{1 + \cos(\phi_r)} = \frac{2(1.25m)}{1 + \cos(51^\circ)} = 1.534m$$

$$r_{r2} = \frac{2f}{1 + \cos(\phi_r)} = \frac{2(1.25m)}{1 + \cos(81^\circ)} = 2,162m$$

Con los radios calculados en función de los ángulos se colocan líneas tangentes a los mismos obteniendo la estructura Parvati como se muestra a continuación (Ilustración 36):

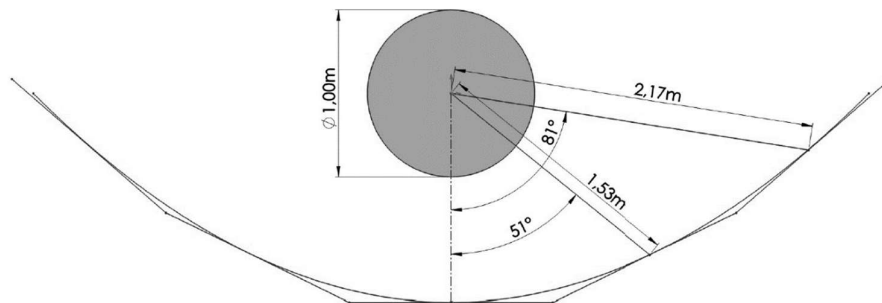


Ilustración 36: Estructura Parvati. Fuente (Autor)

Finalmente se obtienen las dimensiones finales de la estructura Parvati para su construcción como se muestra a continuación (Ilustración 37):

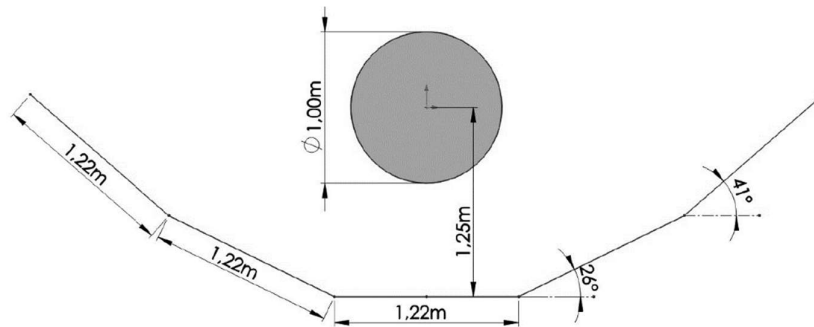


Ilustración 37: Diseño de Estructura Parvati. Fuente (Autor)

A continuación, se muestran los cálculos realizados para obtener la radiación solar directa mediante el método de Hottel:

A continuación, se muestran los diferentes parámetros a calcular:

- Para el cálculo de las constantes a_0, a_1, k según las ecuaciones (33), (34), (35), con una altura de 2.1 km, un clima del tipo invierno latitud media con factores de corrección de 1,03, 1,01 y 1 se tiene:

$$a_0 = r_0[0,4237 - 0,00821(6 - A)^2]$$

$$a_0 = 1,03[0,4237 - 0,00821(6 - 2,1 \text{ km})^2] = 0,308$$

$$a_1 = r_1[0,5055 + 0,00595(6,5 - A)^2]$$

$$a_1 = 1,01[0,5055 + 0,00595(6,5 - 2,1 \text{ km})^2] = 0,627$$

$$k = r_k[0,2711 - 0,01825(2,5 - A)^2]$$

$$k = 1[0,2711 - 0,01825(2,5 - 2,1 \text{ km})^2] = 0,268$$

- Para el cálculo de la declinación solar δ según la ecuación (37), se tomará en cuenta el 18 de junio del 2020 para el cálculo de n (169), se tiene:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(2\pi \frac{(284 + n)}{365}\right)$$

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(2\pi \frac{(284 + 169)}{365}\right) = 23,41^\circ$$

- Para el cálculo del ángulo cenital θ_z según la ecuación (36), de acuerdo con la tabla () para las 10 am w es 30° , latitud de Loja de -4° , se tiene:

$$\cos\theta_z = (\cos(\varnothing) \cos(\delta) \cos(\omega)) + (\sin(\varnothing) \sin(\delta))$$

$$\cos\theta_z = (\cos(-4^\circ) \cos(23,41^\circ) \cos(30^\circ)) + (\sin(-4^\circ) \sin(23,41^\circ)) = 0,765$$

$$\therefore \theta_z = \text{acos}(\cos\theta_z) = \text{acos}(0,209) = 40,087^\circ$$

- Para calcular el coeficiente de transmitancia para la radiación solar directa τ_b según la ecuación (32), con los coeficientes calculados anteriormente, se tiene:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left[\frac{-k}{\cos\theta_z}\right]$$

$$\tau_b = 0,308 + 0,627 \exp\left[\frac{-0,268}{0,765}\right] = 0,749$$

- Para calcular la radiación solar extraterrestre G_{on} según la ecuación (38), con la constante solar de $1367 \frac{W}{m^2}$, n de 169, se tiene:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)\right)$$

$$G_{on} = 1367 \frac{W}{m^2} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi(169)}{365}\right)\right) = 1,323 \times 10^3 \frac{W}{m^2}$$

- Para calcular la radiación solar directa G_{dir} con la ecuación (39) se tiene:

$$G_{dir} = \tau_b G_{on} \cos\theta_z$$

$$G_{dir} = (0,749) \left(1,323 \times 10^3 \frac{W}{m^2}\right) (0,765) = 758,51 \frac{W}{m^2}$$

A continuación, se presenta la (Tabla 7) con el promedio de la radiación solar directa en los meses de junio a Julio:

Tabla 7: Promedio de Radiación Solar Directa.

Fecha	n	Radiación Solar Directa
d/m/a		w/m2
18/6/2020	169	758,5
19/6/2020	170	758,2
20/6/2020	171	758,0
22/6/2020	173	757,9
23/6/2020	174	757,9
24/6/2020	175	757,9
25/6/2020	176	758,1
27/6/2020	177	758,3
28/6/2020	178	758,6
29/6/2020	179	758,9
30/6/2020	180	759,3
1/7/2020	182	760,3
2/7/2020	183	760,9
3/7/2020	184	761,5
4/7/2020	185	762,3
5/7/2020	186	763,1
6/7/2020	187	763,9
7/7/2020	188	764,1
8/7/2020	189	765,8
9/7/2020	190	766,8
10/7/2020	191	767,9
11/7/2020	192	769,0
12/7/2020	193	770,2
13/7/2020	194	771,5
14/7/2020	195	772,8
15/7/2020	196	774,1
16/7/2020	197	775,5
17/7/2020	198	777,0
18/7/2020	199	778,2
19/7/2020	200	780,1
20/7/2020	201	781,7
21/7/2020	202	783,3
22/7/2020	203	785,0
	PROMEDIO:	766,6

Fuente (Autor)

Para obtener la energía necesaria para reducir la humedad del grano del café se tuvo que evaluar la cantidad de energía que requiere cada tramo de la curva de secado.

Luego de haber realizado los respectivos cálculos en cada tramo, se evidenció que en el primer tramo existe la necesidad de mayor cantidad de energía, a continuación, se muestran los cálculos realizados:

- Para calcular la cantidad de masa de agua necesaria a evaporar en una masa de café de 25 Kg, para reducir la Humedad de 53% a 35% con la ecuación (20) se tiene:

$$H = 0.53 - 0.35 = 0.18$$

$$M_a = MpH = (25Kg)(0.18) = 4,5Kg$$

- Para calcular el calor de vaporización del café con una temperatura de 30° y con la humedad de 15%, con la ecuación (21) se tiene:

$$L = (2502,4 - 2,4295\theta)[1 + 1,44408e^{(-2,5011M)}] \left[\frac{kJ}{Kg} \right]$$

$$L = (2502,4 - 2,4295(30^\circ C))[1 + 1,44408e^{(-21,5011(0,18))}] = 2502,68 \left[\frac{kJ}{Kg} \right]$$

- Para calcular el calor específico del café con la humedad del 15%, con la ecuación (22) se tiene:

$$C_p = 1,36 + 5,7859M = 1,36 + 5,7859(0,18) = 2,4 \left[\frac{kJ}{KgK} \right]$$

- Para calcular el flujo másico de aire en la cámara de secado con un valor recomendado por (Corvalan, Horn , Roman, & Saravia, 1999) de $0.01 \frac{Kg}{s \cdot m^2}$ para secadores solares y con el área de la cámara de secado A_r , se tiene:

$$A_r = \pi DL = \pi(1m)(0.9m) = 2.827m^2$$

$$\dot{m}_{aire} = \left(0.01 \frac{Kg}{m^2s}\right)(A_r) = \left(0.01 \frac{Kg}{m^2s}\right)(2.827m^2) = 0.0283 \frac{Kg}{s}$$

- Para calcular el flujo másico de agua se tomó en cuenta 5 días (108000s) en los que se debe reducir hasta la humedad de 35% y la masa de agua calculada:

$$\dot{m}_{agua} = \frac{M_a}{t} = \frac{4,5Kg}{108000s} = 4,167 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s}$$

- Para calcular la cantidad total de energía se tomó en cuenta la energía de calor sensible para elevar la temperatura tanto del agua y aire hasta la temperatura deseada de 30°C y el calor latente para evaporar la masa de agua calculada, con las ecuaciones (23), (24) y (25) se tiene:

$$Q_s = \dot{m}Cp(T_2 - T_1) [kW]$$

$$Q_{saire} = \left(0,0283 \frac{Kg}{s}\right) \left(1,022 \frac{kJ}{KgK}\right) (303,15K - 293,15K) = 0,289 [kW]$$

$$Q_{sagua} = \left(4,167 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s}\right) \left(2,4 \frac{kJ}{KgK}\right) (303,15K - 291,15K) = 1,2 \times 10^{-3} [kW]$$

$$Q_L = \dot{m}_{agua}L [kW]$$

$$Q_{Lagua} = \left(4,167 \times 10^{-5} \frac{Kg}{s}\right) \left(2502,68 \frac{kJ}{Kg}\right) = 0,1043 [kW]$$

$$Q_T = Q_{saire} + Q_{sagua} + Q_{Lagua}$$

$$Q_T = 0,289kW + 1,2 \times 10^{-3}kW + 0,1043kW = 0,3945kW = 394,5W$$

Para poder verificar si el colector Parvati tiene la capacidad de suministrar la energía necesaria para realizar el proceso de secado, en el libro de (Duffie & Beckman, 2013) se planteó una metodología, a continuación, se muestra la misma:

- Para calcular el coeficiente de pérdidas por radiación tomando en cuenta que la temperatura de secado es de 30°C, la emisividad de la superficie de la cámara de secado es de 0,92 puesto que es de Polietileno de Baja densidad y el coeficiente de Stefan Boltzmann es $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$, con la ecuación (12) se tiene:

$$h_r = 4\sigma\epsilon T_r^3 = 4 \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right) (0,92)(303,15K)^3 = 5,81 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Para calcular el coeficiente de pérdidas por transferencia de calor del viento tomando en cuenta que la velocidad promedio en Loja es de aproximadamente 2,5 m/s y la longitud del colector es de 5m, con la ecuación (13) se tiene:

$$h_w = \frac{8,6V^{0,6}}{L^{0,4}} = \frac{8,6 \left(2,5 \frac{m}{s} \right)^{0,6}}{(5m)^{0,4}} = 7,828 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Para calcular el coeficiente de pérdidas, con la ecuación (11) se tiene:

$$U_L = h_w + h_r = 5,81 \frac{W}{m^2 K} + 7,828 \frac{W}{m^2 K} = 13,641 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Para calcular el Número de Reynolds tomando la velocidad de 2,5m/s, viscosidad dinámica del aire de $1,89 \times 10^{-5} \frac{Nm}{s^2}$, densidad del aire de $1,165 \frac{Kg}{m^3}$ y diámetro de la cámara de secado de 1m, con la ecuación (16) se tiene:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\left(1,165 \frac{Kg}{m^3} \right) \left(2,5 \frac{m}{s} \right) (1m)}{\left(1,89 \times 10^{-5} \frac{Nm}{s^2} \right)} = 151515$$

Debido a que $Re > 2000$, entonces el flujo es turbulento.

- Para calcular el número de Nusselt para flujo turbulento, con la ecuación (15) se tiene:

$$N_u = 0,3(R_e)^{0,6} = 0,3(151515)^{0,6} = 384,9$$

- Para calcular el coeficiente de pérdidas por convección, tomando el coeficiente de conductividad térmica de la superficie de c , con la ecuación (14) se tiene:

$$h_{fi} = \frac{N_u K}{D} = \frac{(384,9) \left(0,5 \frac{W}{mK} \right)}{1m} = 10,62 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Para calcular el factor de pérdidas del colector tomando el diámetro exterior de 1m e interior de 0.99m, con la ecuación (17) se tiene:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o}{2K} \ln \frac{D_o}{D_i}} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$F' = \frac{\frac{1}{13,641 \frac{W}{m^2K}}}{\frac{1}{13,641 \frac{W}{m^2K}} + \frac{1m}{\left(10,62 \frac{W}{m^2K}\right) (0,9m)} + \frac{1m}{2 \left(0,5 \frac{W}{mK}\right) \ln \frac{1m}{0,9m}}} = 0,41 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

- Para calcular el factor de eliminación de calor con el flujo másico del aire de 0,0283 Kg/s y el calor específico del aire de 1022 J/KgC, con la ecuación (18) se tiene:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_r}{\dot{m} C_p} \right) \right]$$

$$F_R = \frac{\left(0,0283 \frac{Kg}{s}\right) \left(1022 \frac{J}{KgC}\right)}{\left(2,827m^2\right) \left(13,641 \frac{W}{m^2K}\right)} \left[1 - \exp \left(- \frac{\left(13,641 \frac{W}{m^2K}\right) \left(0,41 \frac{W}{m^2K}\right) \left(2,827m^2\right)}{\left(0,0283 \frac{Kg}{s}\right) \left(1022 \frac{J}{KgC}\right)} \right) \right]$$

$$F_R = 0,32$$

- Para calcular el área útil del colector se tiene:

$$A_a = (W_a - D)L = (5m - 1m)(0,9m) = 3,6m^2$$

- Para calcular la energía útil que proporciona el colector tomando S como la irradiancia proporcionada por el atlas solar en la ciudad de Loja de 605,2 $\frac{W}{m^2}$, temperatura de la cámara de secado de 30°C y la temperatura ambiente de 20°C, con la ecuación (19) se tiene:

$$Q_u = F_R [S A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] [W]$$

$$Q_u = (0,32) \left[\left(605,2 \frac{W}{m^2}\right) (3,6m^2) - (2,827m^2) \left(13,641 \frac{W}{m^2K}\right) (303,15K - 293,15) \right]$$

$$Q_u = 567,03 W$$

Para calcular el rendimiento teórico que posee el secador solar de café. Es necesario calcular el calor requerido para evaporar la humedad hasta la cantidad recomendada por la normativa seguida.

- Para calcular la energía necesaria para evaporar el café hasta una humedad del 11,3%, con la masa de agua a evaporar de 10,425 kg, con las ecuaciones (20) a (25), se tiene:

$$Q_T = Q_{saire} + Q_{sagua} + Q_{Lagua}$$

$$Q_T = 0,202kW + 3,554x10^{-2}kW + 3,858x10^{-4}kW = 0,238kW = 238W$$

- Con el resultado de la energía que puede suministrar el colector solar de 567,03 W obtenida en el apartado anterior y la cantidad de energía requerida para evaporar el café, con la ecuación (26), se tiene que el rendimiento es:

$$\eta_{sec} = \frac{Q_T}{Q_u} = \frac{238W}{567,03W} = 0.42 = 42\%$$

Una vez obtenido el rendimiento y la cantidad de energía que el colector Parvati es capaz de suministrar la cantidad de energía necesaria para realizar el secado del café, se procedió a realizar el cálculo de la potencia del actuador lineal que mueve la estructura Parvati en el momento en el que la temperatura sea mayor a la recomendada para un secado óptimo. Para realizar esto se aplicó conceptos de fuerzas y momentos. En primer lugar, se calculó el peso de cada plancha de acero inoxidable de la estructura Parvati:

Se utilizó un resorte para ayudar al retorno de las placas que conforman la estructura Parvati, para poder realizar esto primeramente fue necesario calcular cual será el peso de la plancha de acero inoxidable en conjunto con su marco hecho de tubos, el cálculo del mismo se detalla a continuación:

Las dimensiones de la plancha de acero inoxidable son de 1.22m x 0.9m x 0.4mm.

La masa de la plancha de acero inoxidable AISI 304 es de 3.118 Kg/m².

La masa total de la plancha es:

$$m_{Planc} = (1,22m)(0,9m) \left(3,118 \frac{Kg}{m^2} \right) = 3,42 Kg$$

Ahora se calcula la masa de los tubos.

La masa por m de los tubos de $\frac{3}{4} \times 1.5mm$ es de 0,88 Kg/m.

La masa total de los tubos es:

$$m_{tubos} = (1,22m + 1,22m + 0,9m + 0,9m) \left(0,88 \frac{Kg}{m} \right) = 3,73 Kg$$

La masa total es:

$$m_{Total} = m_{tubos} + m_{Planc} = 3,42 Kg + 3,73 Kg = 7,15 Kg$$

El peso total es

$$W_{Total} = (7,15 Kg) \left(9,81 \frac{m}{s^2} \right) = 70,15 N$$

También se tomará en cuenta la fuerza del viento:

$$F_V = APC_d, \text{ con } P = 0.613V^2$$

Para el diseño se tomará una velocidad del viento de 10 m/s y un factor de C_d de 1,4

$$F_V = APC_d = (1,22m)(0,9m)(0,613) \left(10 \frac{m}{s} \right)^2 (1,4) = 94,23N$$

Finalmente se obtuvo la fuerza total para el diseño se tiene:

$$F_T = W_{Total} + F_V = 70,15N + 94,23N = 164,38N$$

Con el dato de la fuerza obtenida se procedió a calcular el resorte (Ilustración 38), los cálculos se detallan a continuación.

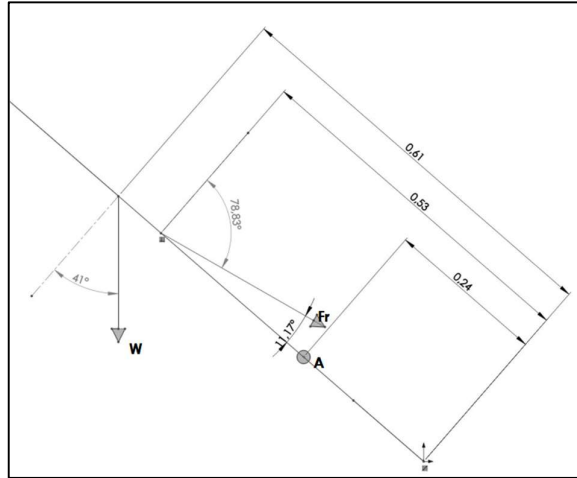


Ilustración 38: Fuerzas para Cálculo de Resorte. Fuente (Autor)

$$+\circlearrowleft \sum M_A = 0$$

$$-F_R(0.53m - 0.24m) \cos(78,83^\circ) + W(0.61m - 0.24m) \cos(41^\circ) = 0$$

$$F_R = \frac{(164,38N)(0.61m - 0.24m) \cos(41^\circ)}{(0.53m - 0.24m) \cos(78,83^\circ)} = 817,1N$$

A continuación, se calculó la fuerza de la tensión en el cable de acero F_1 (Ilustración 39) en la parte izquierda de la estructura Parvati:

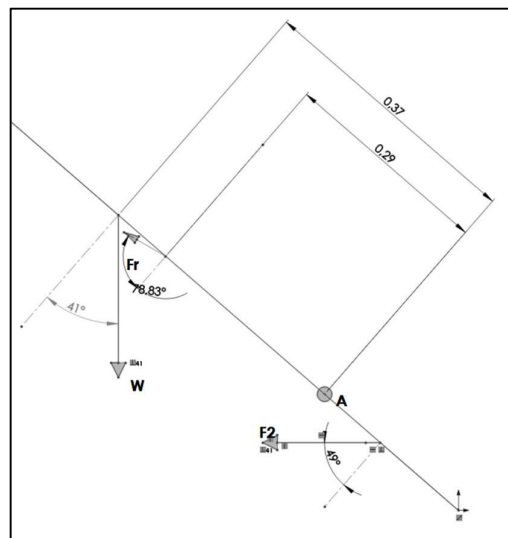


Ilustración 39: Cálculo de Tensión en Cable. Fuente (Autor)

$$+\circlearrowleft \sum M_A = 0$$

$$W(0.37m) \cos(41^\circ) - F_2(0.1m) \cos(49^\circ) + F_r(0.29m) \cos(78.83^\circ) = 0$$

$$(164,38N)(0.37m) \cos(41^\circ) - F_2(0.1m) \cos(49^\circ) + (817,1N)(0.29m) \cos(78.83^\circ) = 0$$

$$F_2 = \frac{(164,38N)(0.37m) \cos(41^\circ) + (817,1N)(0.29m) \cos(78.83^\circ)}{(0.1m) \cos(49^\circ)} = 1399,35N$$

Se calculó la fuerza necesaria en el actuador (Ilustración 40) para mover la estructura Parvati:

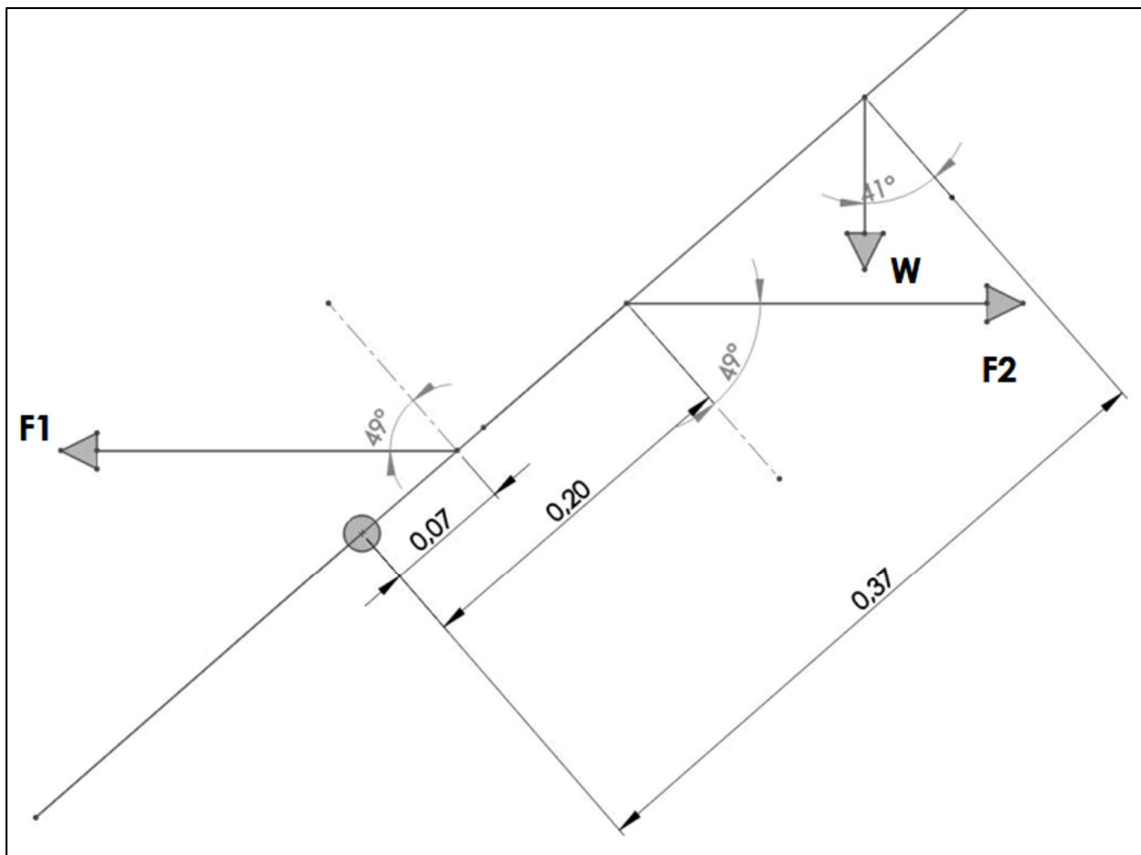


Ilustración 40: Calculo Fuerza de Actuador. Fuente (Autor)

$$+\circlearrowleft \sum M_A = 0$$

$$F_1(0.07 m) \cos(49^\circ) - F_2(0.2 m) \cos(49^\circ) - W(0.37 m) \cos(41^\circ) = 0$$

$$F_1(0.07 m) \cos(49^\circ) - (597.5 N)(0.2 m) \cos(49^\circ) - (70.19 N)(0.37 m) \cos(41^\circ) = 0$$

$$F_1 = \frac{(1399,35N)(0.2m) \cos(49^\circ) + (164,38N)(0.37m) \cos(41^\circ)}{(0.07m) \cos(49^\circ)} = 4997,65 N$$

Para obtener la potencia del actuador se tiene:

$$P = F * V$$

$$P = (4997,65 N) \left(0.01 \frac{m}{s}\right) = 49,97 W$$

Se aplicó un factor de seguridad de 1.4

$$Pot = 49,97 W * 1.4 = 70 W$$

Teniendo ya la potencia se seleccionó un actuador lineal de 1/10 HP (75 W) a 110 V con una corriente de operación de 0.67 A.

Para el diseño y selección del ventilador se tiene:

A continuación, se muestran los cálculos realizados para dimensionar el ventilador para que disminuir la temperatura del café en los casos que llegue a 35 °C:

- Para calcular el calor específico del café con la Ecuación 20, con el caso más crítico de humedad de 53%, se tiene:

$$C_p = 1,36 + 5,7859CH = 1,36 + 5,7859(0,53) = 4,422 \frac{kJ}{KgK}$$

- Para calcular el calor necesario para reducir la temperatura del café con la Ecuación 26, con la temperatura del aire mayor de 35°C y temperatura menor de 25°C, masa de café de 25 kg y con un tiempo de secado de 1200s, se tiene:

$$\dot{q} = \frac{m_{cps} C_{p,café} (T_{f,a} - T_{i,a})}{t}$$

$$\dot{q} = \frac{(25 kg) \left(4,422 \frac{kJ}{kgk}\right) (35^\circ C - 25^\circ C)}{1200 s} = 0,92125 \frac{kJ}{s}$$

- Para calcular el flujo másico de aire necesario para disminuir la temperatura de café, con el calor específico del aire a 35°C y humedad de 53% de $1,88 \frac{kJ}{kgk}$, con la densidad del aire de $1,086 \frac{kg}{m^3}$ usando la Ecuación 27 se tiene:

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}}{C_{p,a}(T_{f,a} - T_{i,a})} = \frac{0,92125 \frac{kJ}{s}}{1,88 \frac{kJ}{kgk} (35 \text{ °C} - 25 \text{ °C})} = 0,049 \frac{kg}{s}$$

$$Q_2 = \left(0,049 \frac{kg}{s}\right) \left(\frac{1 m^3}{1,086 kg}\right) = 0,04512 \frac{m^3}{s}$$

- Para calcular el caudal total de aire necesario para mantener el flujo másico de aire y reducir hasta la temperatura deseada se deben sumar Q_1 y Q_2 .

$$Q_t = 0,042 \frac{m^3}{s} + 0,04512 \frac{m^3}{s} = 0,08712 \frac{m^3}{s} = 185 \text{ CFM}$$

Finalmente, con el dato final de caudal se seleccionó un ventilador de 190 CFM, potencia de 45 W y voltaje de funcionamiento de 110 V, en este caso se realizaron las respectivas pruebas colocando el ventilador de 190 CFM como extractor en la parte superior de la cámara de secado y en la parte inferior un ventilador usado en lugar de una rejilla.

6.2. Experimentación para obtención de datos

6.2.1. Condiciones de Monitoreo

El monitoreo se lo realizó con las siguientes condiciones:

- Periodo de monitoreo de 33 días de acuerdo a la recomendación de (Diaz, 2014)
- 6 horas de Secado al día desde las 10:00 hasta las 16:00.

6.2.2. Disposición de sensores

- Se colocó un sensor en la cama de secado central para medir la temperatura del café (Ilustración 41).

- Se colocó un sensor en el interior de la cámara de secado (Ilustración 42) lejos de las camas de secado para medir la temperatura y humedad en el interior de la misma.
- Se colocó un sensor en la parte exterior de la cámara de secado (Ilustración 43) para medir la temperatura y humedad exterior.



Ilustración 41: Disposición de Sensor de Temperatura de Café. Fuente (Autor)



Ilustración 42: Disposición de Sensor de Temperatura y Humedad de la Cámara de Secado.

Fuente (Autor)



Ilustración 43: Disposición de Sensor de Temperatura y Humedad del Medio Ambiente.

Fuente (Autor)

6.2.3. Representación gráfica de los resultados obtenidos

Para la el trazado de la gráficas para su análisis correspondiente se siguió la norma ASAE-S580 (Practices & Practices, n.d.) en donde se señala que el número mínimo del coeficiente de determinación (R^2) es de 0,75.

6.2.4. Radiación Solar en la Ciudad de Loja

En la siguiente gráfica se muestran los datos promedio de radiación solar directa obtenidos durante la fase de pruebas realizadas utilizando un piranómetro siguiendo la normativa de 33 días desde las 10 am hasta las 4 pm.

Una vez obtenidos los datos de las pruebas se realizan las respectivas gráficas para el análisis correspondiente.

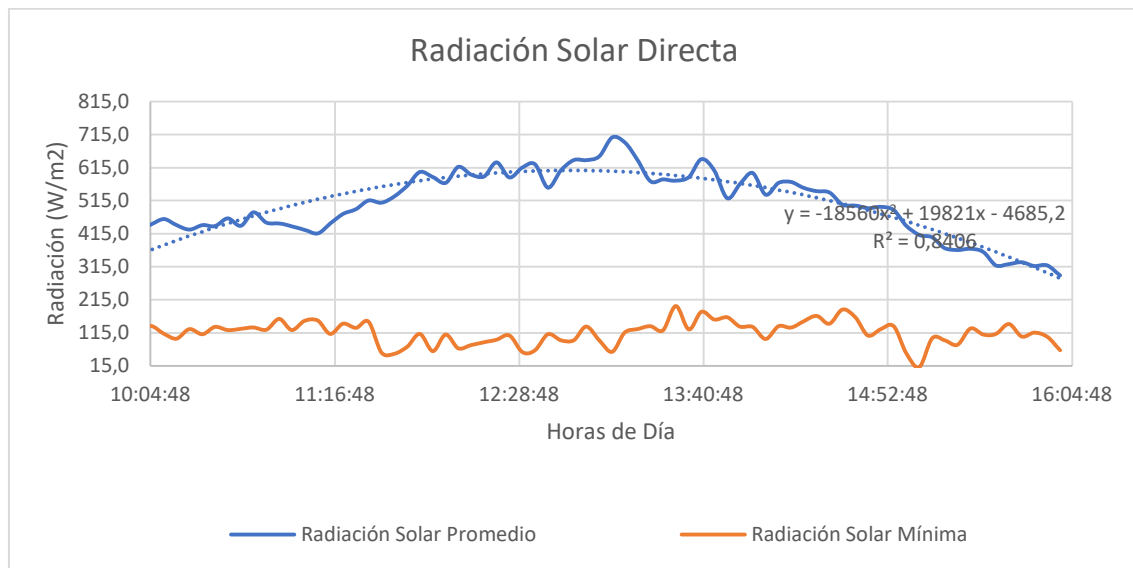


Ilustración 44: Radiación Solar Promedio. Fuente (Autor)

En la (Ilustración 44) se muestra que al obtener el coeficiente de determinación (R^2) de la radiación solar promedio se tiene un valor de 0.8406, el ser un valor mayor al recomendado por la norma ASAE-S580 (Practices & Practices, n.d.) se considera que la función de la curva tiene una buena correlación entre sus datos.

Se puede observar que ha existido una variación considerable de los niveles de radiación, siendo ligeramente bajos desde las 10 am hasta las 12 pm, desde las 12 pm hasta las 3 pm se puede observar que existen niveles de radiación considerables, para posteriormente alrededor de las 4 pm disminuir.

En relación a los valores máximos se dan especialmente alrededor del mediodía, mientras que los mínimos se dan al finalizar el día de pruebas.

6.2.5. Control de temperatura

Las pruebas para comprobar si el funcionamiento de los ventiladores es efectivo para poder controlar la temperatura y que la misma no sobrepase el límite recomendado por la normativa

seguida (Díaz, 2014). Las pruebas de comportamiento del control de temperatura se los realizó durante 3 días.

A continuación, se muestran las tres gráficas correspondientes (Ilustración 45), (Ilustración 46), (Ilustración 47)):

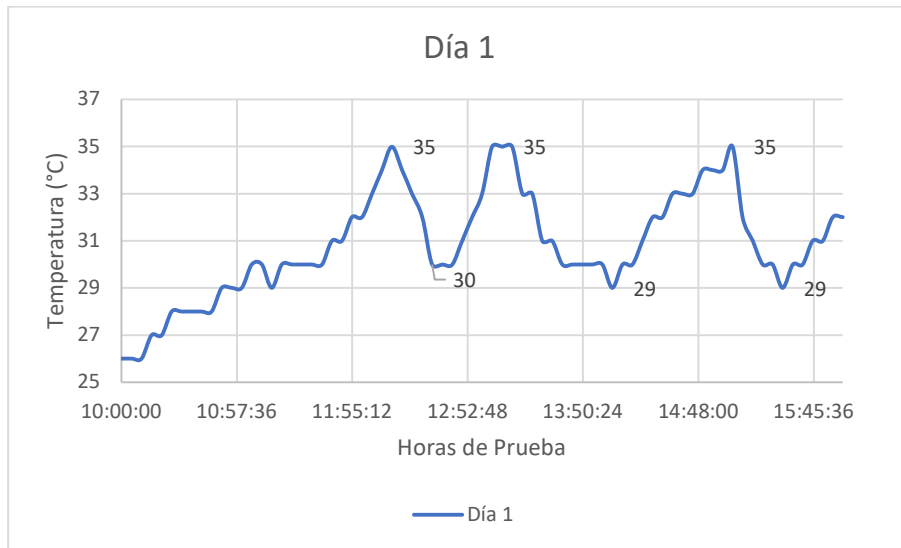


Ilustración 45: Comportamiento de Sistema de Control Dia 1. Fuente (Autor)

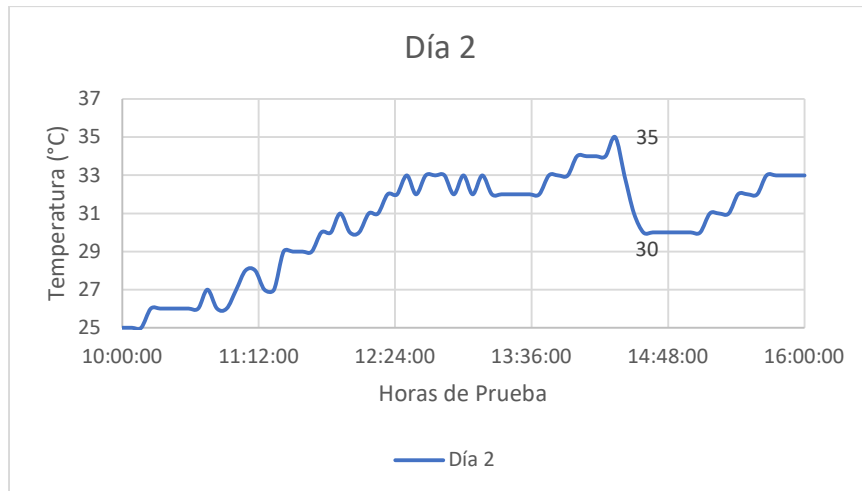


Ilustración 46: Comportamiento de Sistema de Control Dia 2. Fuente (Autor)

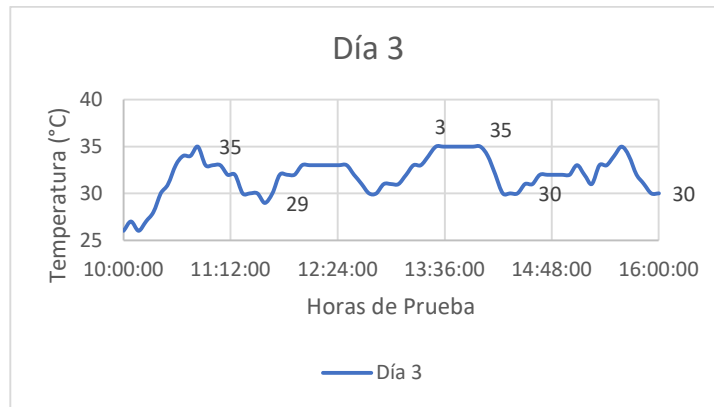


Ilustración 47: Comportamiento de Sistema de Control Dia 3. Fuente (Autor)

En las tres gráficas se puede observar que el sistema de control de temperatura permitió mantener una temperatura inferior o igual 35°C, evitando así el daño al grano de café. La velocidad con la que los ventiladores disminuyen la temperatura depende de factores como la velocidad del viento, radiación solar en el instante y la altura de la capa de café.

6.2.6. Cámara de Secado

En la (Ilustración 48) se muestran las temperaturas promedio del café, cámara y medio ambiente. Tomados durante 6 horas en los 33 días de prueba.

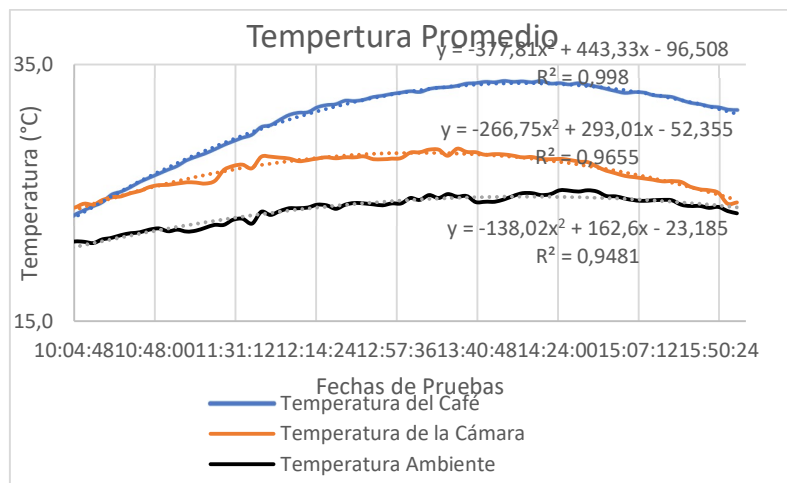


Ilustración 48: Comparación Temperaturas. Fuente (Autor)

En las gráficas se puede observar un valor de coeficiente de determinación (R^2) cercano a uno lo que nos indica que la función característica de las curvas de las tres temperaturas son confiables, con las mismas se podría prever cuales serían los valores en horas diferentes a las evaluadas.

Durante la primera semana los valores de temperatura del café son bajos debido a que se encuentra en la fase de mayor humedad del proceso por lo cual se requiere mayor cantidad de calor para alcanzar altas temperaturas, a medida que la semana finaliza el valor de temperatura llega hasta aproximadamente 30°C . Durante las siguientes semanas la temperatura del café va incrementando a medida que la humedad del café disminuye alcanzando valores en el límite del mencionado por la normativa.

Las temperaturas del café, la cámara y el medio ambiente en los primeros días de las pruebas se encuentran en una magnitud similar, a medida que los días de prueba avanzan, existe una diferencia considerable entre la temperatura del café y las dos restantes, llegando a ser de hasta 13°C .

6.2.7. Curva de Secado

En la (Ilustración 49) se muestra la evolución del secado de la humedad de café, en 33 días con 6 horas al día. Tomando en cuenta que la medición de la humedad se la realizó mediante el método Gravimet, dicho método enuncia que es posible obtener la humedad mediante el peso que va perdiendo la masa de café a secar.

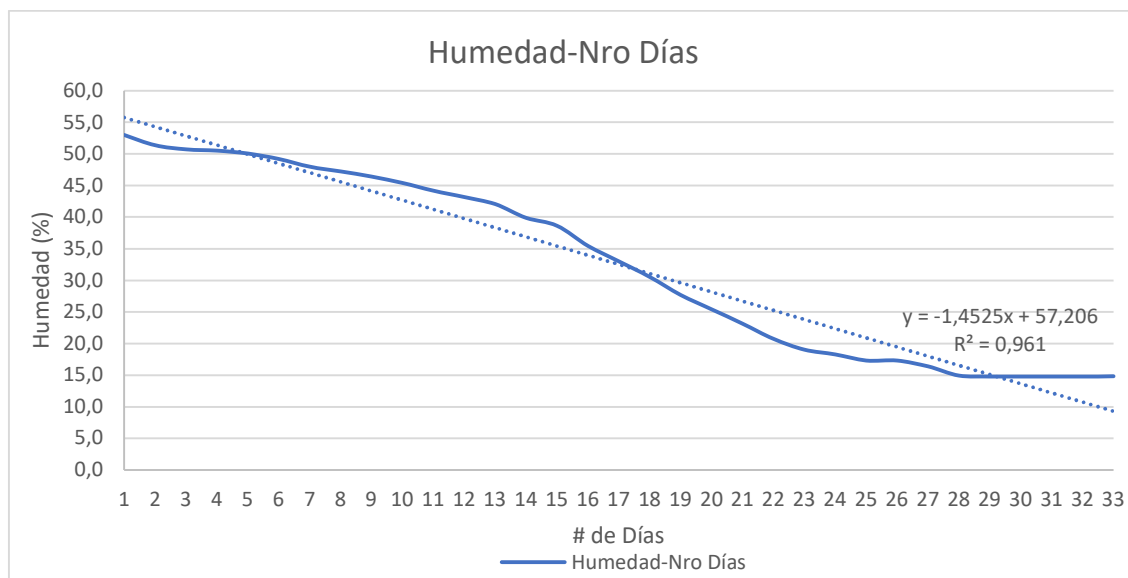


Ilustración 49: Curva de Secado del Café obtenida por el método Gravimet. Fuente (Autor)

La gráfica muestra que al finalizar los 33 días la humedad obtenida en el café es de aproximadamente 15%, según la normativa la humedad requerida para el correcto almacenamiento es de 12%. Esta diferencia de humedad al finalizar los 33 días puede ser debido a que existen múltiples variables que pueden alterar en gran medida los resultados como son el flujo de aire, el tiempo de temperatura estable, el nivel de humedad de la cámara entre otras.

Al final de los 33 días del proceso de secado mediante el método Gravimet se obtuvo una humedad de 14,8%, para corroborar si es un valor confiable, se utilizó el medidor de Humedad de Granos G-7 Grain Moisture Meter proporcionado por la Universidad Nacional de Loja, los resultados de esta medición mostraron que la humedad al finalizar los 33 días es de 11.3%, esta diferencia entre resultados posiblemente es debido a que el valor de humedad inicial tomado de 53% no es el correcto, al no tener el medidor G-7 no se pudo corroborar el nivel de humedad inicial.

En la gráfica mostrada se muestra que la función tiene un coeficiente de determinación de 0,961 lo cual permite decir que el modelo posee una buena fiabilidad para predicciones en futuras investigaciones.

A continuación, se muestra la (Tabla 8) comparativa entre la humedad obtenida mediante del método Gravimet y la humedad obtenida con el medidor de Humedad G-7.

Tabla 8: Comparativa de Humedades obtenidas

Método Gravimet	Medidor de Humedad G-7
14,8 %	11,3 %

, Fuente (Autor)

6.2.8. Eficiencia del Colector

En la (Tabla 9) se muestran los datos del rendimiento obtenidos durante los 33 días de pruebas.

Tabla 9: Datos de Rendimiento del Secador de Café.

N día	Qu	Qu	Rad	Radiación	Área	Masa a Evaporar	Humedad	Reducción Humedad	Rend
	W	W/día	W/m2/día	W/m2	m ²	kg	%	%	%
1	247,9	12890,3	33866,8	651,3	3,6	0,4	53,0	1,6	10,57
2	253,4	18496,0	18631,6	255,2	3,6	0,175	51,4	0,6	27,58
3	122,4	8931,6	14675,8	257,5	3,6	0,05	50,7	0,2	16,91
4	186,5	13615,2	29087,9	398,5	3,6	0,1	50,5	0,5	13,00
5	230,1	16798,8	23206,4	393,9	3,6	0,225	50,1	0,8	20,11
6	295,9	21597,1	46772	640,7	3,6	0,3	49,2	1,2	12,83
7	169,5	12372,8	17510,3	355,1	3,6	0,2	48,0	0,8	19,63
8	342,8	25021,5	50296,8	689,0	3,6	0,2	47,2	0,8	13,82
9	290,6	21212,3	20840,1	430,0	3,6	0,25	46,4	1,0	28,27
10	267,0	19492,5	37800	517,8	3,6	0,3	45,4	1,2	14,32
11	290,6	21210,2	29228,1	579,3	3,6	0,25	44,2	1,0	20,16
12	151,4	11051,5	27700,9	379,5	3,6	0,3	43,2	1,2	11,08
13	288,0	21023,3	30875,4	496,2	3,6	0,525	42,0	2,1	18,91

14	327,2	23884,9	44543,8	610,2	3,6	0,325	39,9	1,3	14,89
15	366,5	26754,5	30157,2	653,0	3,6	0,8	38,6	3,2	24,64
16	380,4	27769,9	61849,8	847,3	3,6	0,6	35,4	2,4	12,47
17	382,6	27932,7	23739,3	546,3	3,6	0,625	33,0	2,5	32,68
18	214,8	15682,6	29442,3	403,3	3,6	0,7	30,5	2,8	14,80
19	378,5	27632,7	37302,5	673,1	3,6	0,575	27,7	2,3	20,58
20	320,9	23428,6	36705,3	502,8	3,6	0,575	25,4	2,3	17,73
21	380,9	27802,1	20869,2	424,6	3,6	0,6	23,1	2,4	37,01
22	365,6	26687,3	57156	783,0	3,6	0,425	20,7	1,7	12,97
23	368,8	26924,6	23865,1	453,5	3,6	0,175	19,0	0,8	31,34
24	146,1	10666,0	29303,7	401,4	3,6	0,25	18,3	0,9	10,11
25	260,1	18985,1	31612,1	628,1	3,6	0,225	17,3	0,1	16,68
26	259,0	18907,0	26114,1	357,7	3,6	0,375	17,2	0,8	20,11
27	361,0	26350,8	35767,5	660,7	3,6	0,025	16,4	1,4	20,46
28	379,0	27669,9	50403,7	690,5	3,6	0,025	14,9	0,2	15,25
29	90,1	6577,3	13469,8	291,3	3,6	0,025	14,8	0,1	13,56
30	61,2	4468,3	11572,8	158,5	3,6	0,025	14,7	0,1	10,73
31	176,8	12904,9	21589,16	488,0	3,6	0,025	14,6	0,1	16,60
32	176,8	12905,7	16535	241,0	3,6	0,025	14,5	0,1	21,68
33	119,0	8685,5	16211,4	321,7	3,6	0,025	14,4	14,4	14,88
Prom	262,2	18979,8	30263,7	490,3					18,38

Fuente (Autor)

En la tabla se puede observar que se tiene un rendimiento promedio de los 33 días de pruebas de 18,38 %.

A continuación, se muestran las gráficas relacionando el rendimiento con la temperatura del café (Ilustración 51), la radiación solar (Ilustración 50) y la humedad del café (Ilustración 52).

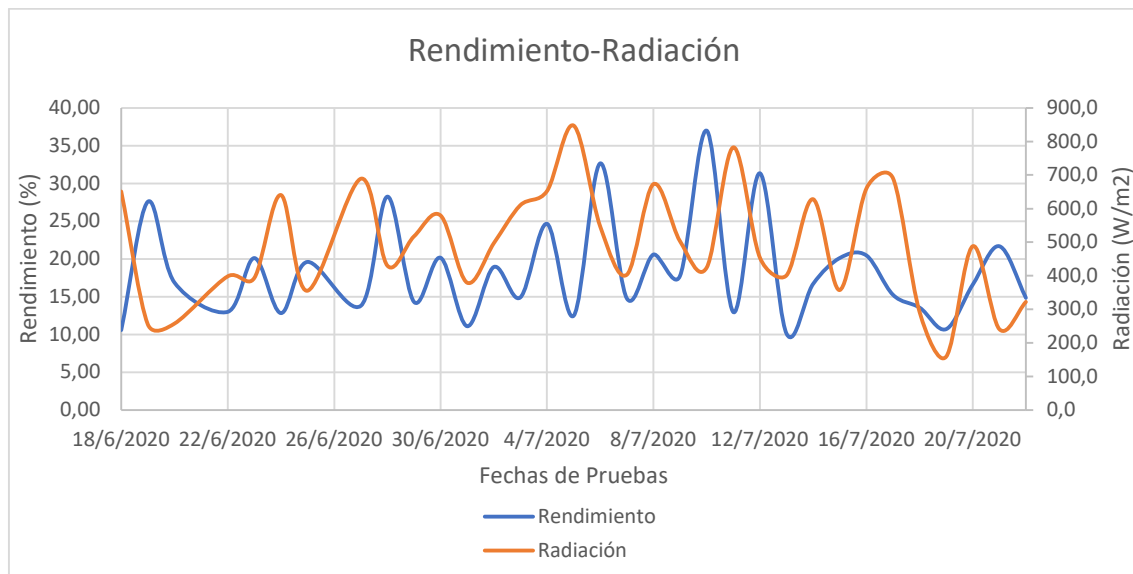


Ilustración 50: Comparación Rendimiento-Radiación. Fuente (Autor)

En la Figura se muestran los datos del rendimiento del colector solar en relación a la radiación, en esta se evidencia que no necesariamente el rendimiento es proporcional a el nivel de radiación solar, en el inicio del proceso de secado se puede observar que con una radiación relativamente baja se pudo reducir la humedad en una cantidad considerable, esto debido a que el café posee una humedad bastante alta con lo cual la humedad de la capa superficial del café tiende a tener facilidad para evaporarse.

A medida que el proceso del secado avanza, reducir la humedad es más difícil debido a que el café posee menor cantidad de agua, y es necesario una diferencia de temperatura mayor para poder realizar la reducción de humedad. En la etapa final del secado el rendimiento baja debido a que el café tiene una escasa cantidad de agua en la superficie, por lo cual la disminución de temperatura depende en mayor parte en cómo puede moverse el agua restante en el interior del grano, por lo tanto, para la fase final se requiere grandes temperaturas para lograr la humedad final deseada.

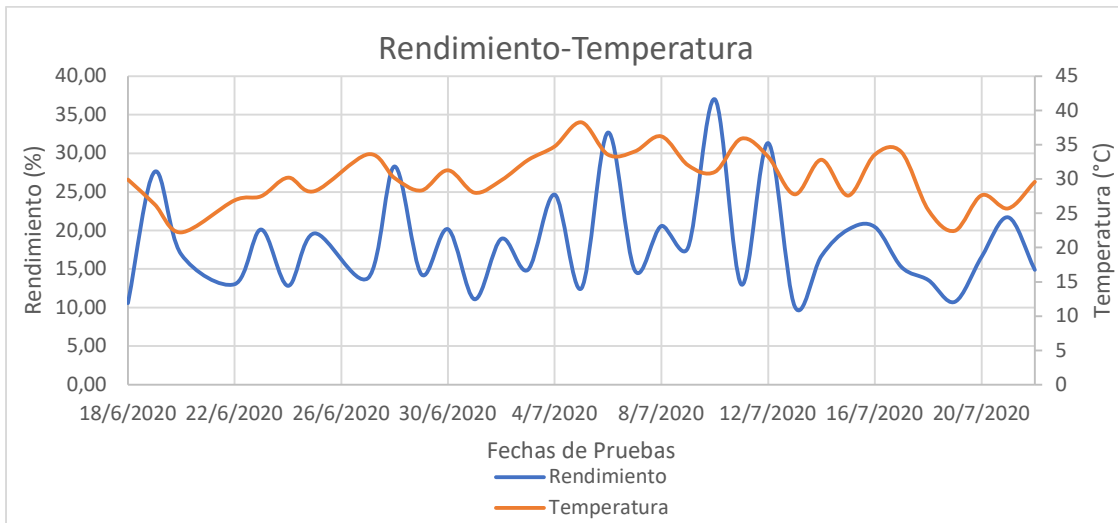


Ilustración 51: Comparación Rendimiento-Temperatura. Fuente (Autor)

En la gráfica existe una mayor proporcionalidad en comparación con la gráfica anterior, es decir que a mayor temperatura se podrá obtener una mayor reducción de humedad, sin embargo, una excesiva temperatura el grano del café puede dañarse y condicionar el proceso de secado(Díaz, 2014).

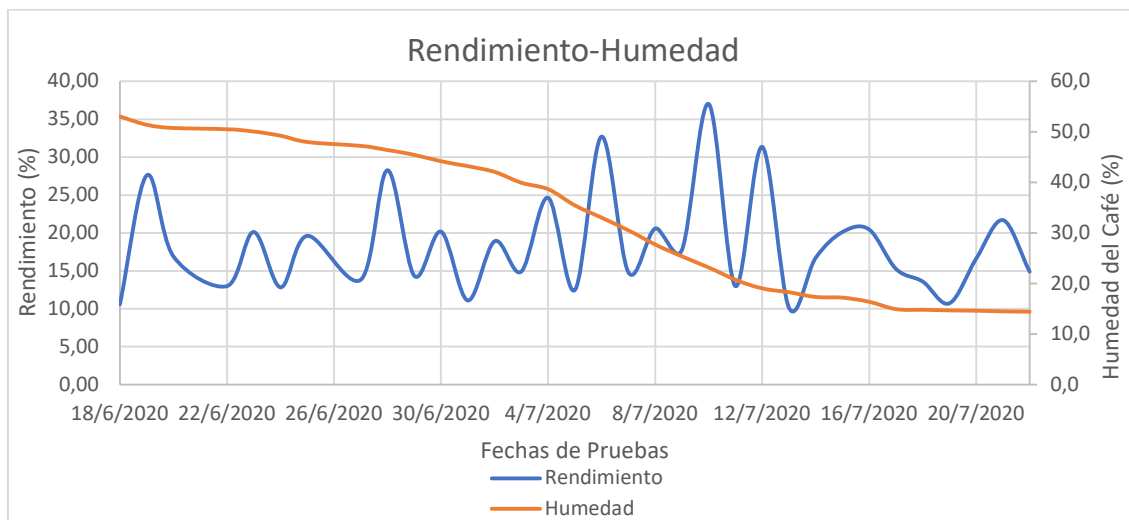


Ilustración 52: Comparación Rendimiento-Humedad. Fuente (Autor)

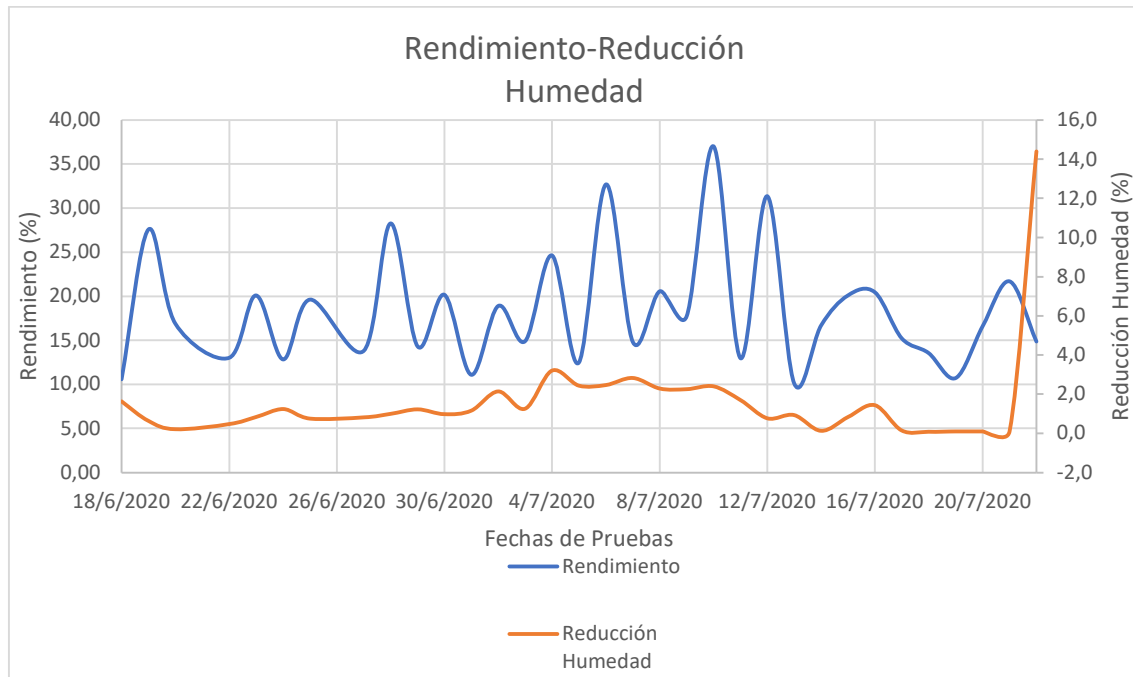


Ilustración 53: Comparación Rendimiento-Reducción Humedad. Fuente (Autor)

6.3. Comparación de resultados obtenidos en las pruebas con los cálculos realizados.

- Comparación de Radiación Solar obtenida del Atlas Solar proporcionada por (CONELEC, 2008) con la obtenida a través del piranómetro (Tabla 10) durante la fase de experimentación .

Tabla 10: Comparación de Radiación Solar Cálculos-Experimentación.

Radiación Solar Promedio en la Provincia de Loja(W/m²)	
Atlas Solar	Piranómetro
605,2	506,1

Fuente (Autor)

- Comparación de la cantidad de energía que proporciona el colector solar (Tabla 11).

Tabla 11: Comparación de Energía que Proporciona el colector Cálculos-
Experimentación.

Energía que proporciona el colector Solar(W)	
Cálculos	Experimentación
567,03	531,16

Fuente (Autor)

- Comparación del rendimiento obtenido mediante cálculos y el obtenido experimentalmente (Tabla 12).

Tabla 12: Comparación de Rendimiento del Secador Solar de Café.

Rendimiento del Secador Solar de Café (%)	
Cálculos	Experimentación
42	18,38

Fuente (Autor)

Los resultados mostrados en las 2 primeras tablas se asemejan mucho entre sí, lo cual indica que la metodología usada permite obtener datos confiables para nuevos proyectos de investigación. Sin embargo, en la tercera tabla correspondiente a el rendimiento los valores difieren considerablemente, esto pudo ser debido a que en la fase de experimentación no se puede controlar variables como son las condiciones ambientales, radiación solar, etc.

- Comparación de la curva de secado ideal (Ilustración 54) con la curva de secado obtenida durante los 33 días de secado (Ilustración 55).

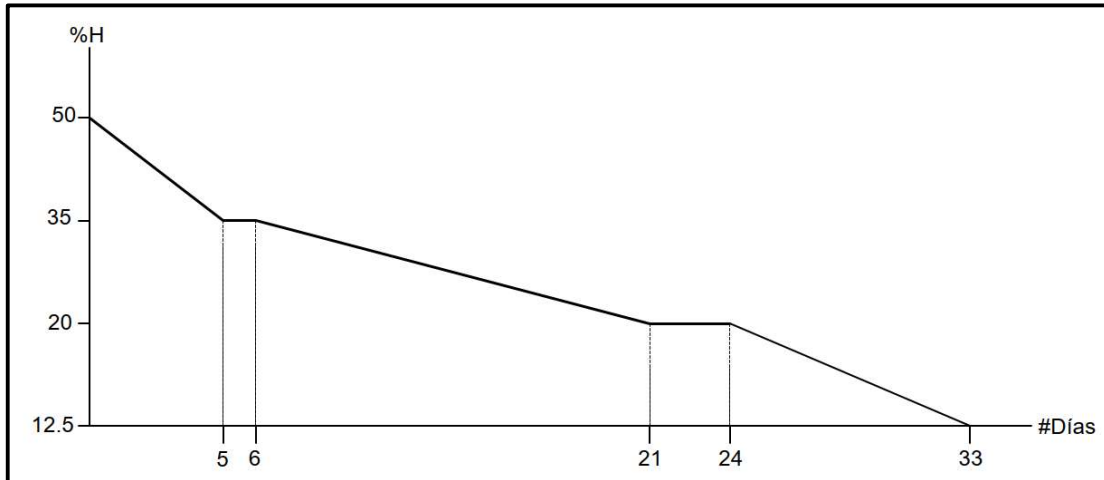


Ilustración 54: Curva de Secado Ideal. Fuente (Autor)

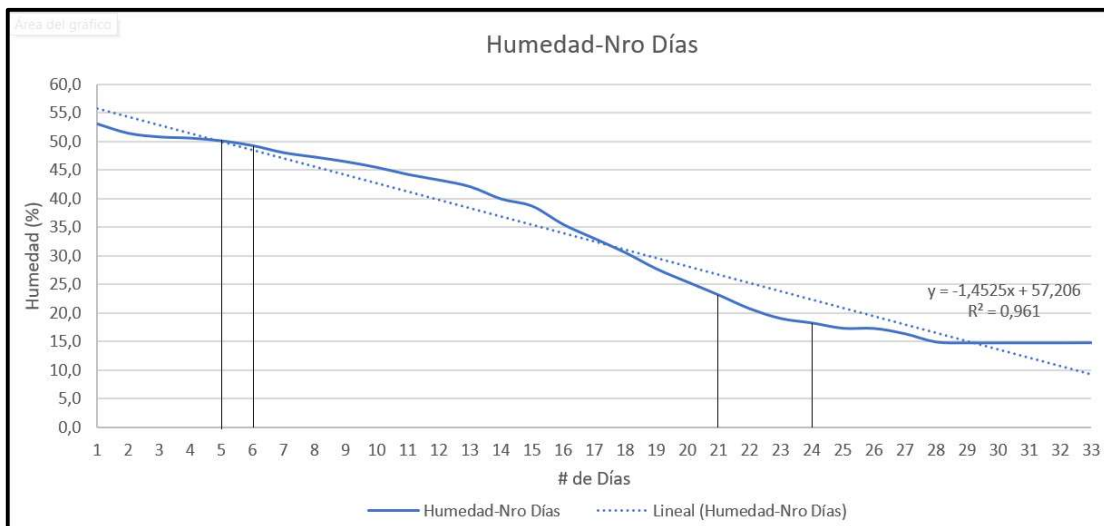


Ilustración 55: Curva de Secado obtenida Experimentalmente. Fuente (Autor)

Los resultados muestran que la curva obtenida experimentalmente difiere de la curva ideal especialmente en el inicio del proceso de secado donde se evidencia que la disminución de humedad es menor a la que se debía obtener, esto ocurrió debido a que del día 2 a 6 se presentaron lluvias y bajas temperaturas.

En el siguiente tramo de la curva hasta los 21 días se tiene una humedad aproximada de 18%, lo cual se asemeja a la humedad que debe poseer el café según la normativa. En el último tramo

se observa que al finalizar el periodo de pruebas se obtuvo una humedad aproximada del 15%, sin embargo, hay que tener en cuenta que dicha humedad se la obtuvo mediante el método Gravimet que relaciona la humedad con el peso de una muestra de café, para corroborar si esta humedad obtenida es la correcta se usó un instrumento de medición de humedad de granos que mostró que la humedad se encontraba en 11,3%. Por lo tanto, se puede decir que el café llegó a la humedad recomendada en la normativa seguida.

6.4. Costo del secador solar de café.

Para el cálculo del costo del secador solar de café (Tabla 13) se tuvo en cuenta tanto el precio de los elementos comprados como de la mano de obra en las que se requirió máquinas especiales como fue el rolado de la estructura de soporte de la cámara de secado.

Tabla 13: Costo de Construcción de Secador de Café.

Elementos Comprados			
Cantidad	Denominación	Costo/unidad	Costo Total
8	Tubo Cuadrado 3/4 x 1,5 mm	6,0	48,0
2	Tubo Cuadrado 5/8 x 1,2 mm	9,5	18,9
1	Actuador Lineal 1/8 HP, 110V	50,0	50,0
2	Planchas de Acero Inoxidable	28,0	56,0
1	Angulo 25 x 25 x 2	10,0	10,0
1	Platina 20 x 20 x 3	3,0	3,0
60	Pernos 1/4	0,1	6,0
20	Pernos 1/8	0,1	2,0
4	Libra de Electrodo	2,0	8,0
4	Discos de Cortar	2,0	8,0
1	Hoja de Sierra	1,5	1,5
4	Brocas	1,5	6,0
11	Metro de Cable de Acero	0,4	3,9
4	Garruchas	1,5	6,0
1	Arduino Mega 2560	21,0	21,0
2	Termocuplas Tipo K	13,0	26,0

3	Relés 5 V 2 Canales	3,5	10,5
1	Pantalla LCD 16 x 2	6,1	6,1
1	Módulo I2C	3,5	3,5
2	Switch 3 Posiciones	0,8	1,7
2	Power Jack DC	0,7	1,3
1	Plug 110V	0,3	0,3
1	Switch 110V	0,8	0,8
3	Jumpers	1,0	3,0
2	Regleta de Protoboard	6,0	12,0
2	Molex 10 pines	1,4	2,7
1	Molex 4 pines	0,9	0,9
1	Rollo de Estaño	7,1	7,1
1	Sensor DHT22	8,0	8,0
1	Tomacorriente	1,5	1,5
1	Ventilador 50 CFM	7,0	7,0
1	Ventilador 190 CFM	15,5	15,5
1	Sensor DHT11	2,0	2,0
Mano de Obra			
Denominación		Costo	
Rolado de Tubos 5/8		10	
Construcción de Camas de Secado y Puerta		40	
Construcción de Caja de Control		15	
Soldadura de Estructura		30	
TOTAL (\$)			
453,2			

Fuente (Autor)

7. DISCUSIÓN

En la presente investigación al realizar el diseño, construcción y monitoreo de un secador solar con geometría de doble ángulo, en lo concerniente a los aspectos metodológicos empleados, en primer lugar, se realizó la respectiva búsqueda de información en diferentes fuentes bibliográficas confiables en las cuales se pudo encontrar una cantidad considerable de información en relación a los aspectos de monitoreo y construcción del secador de café. En cuanto a la geometría Parvati no se encuentra mucha información, sin embargo, se evidencia la existencia de dos escritos, uno de los cuales consiste en un proyecto de desarrollo de una cocina solar y el otro se trata de un sistema de vaporización de agua para un sistema de bombeo, esto evidencia que la geometría Parvati tiene una capacidad de concentración de calor aceptable lo cual se puede evidenciar en el presente trabajo. En lo referente al sistema de control del secador de café existen varias opciones que se podría usar, sin embargo, el sistema empleado en este proyecto se la eligió debido a su bajo costo y también porque es una tecnología de fácil acceso.

Antes de realizar el dimensionamiento de cada uno de los elementos que conforman el colector solar se tomó en cuenta una recomendación en base a la cual se evaluaron los resultados, una vez conocidos los diferentes ámbitos que se mencionan en la normativa se procedió a realizar el dimensionamiento de la cámara de secado durante el cual la principal fuente de bibliografía usada fue el libro de (Duffie et al., 1985), a continuación se dimensionaron los elementos que conforman el sistema del colector solar y se realizó la selección de los elementos que conforman el sistema de monitoreo.

Al finalizar la investigación se obtuvieron resultados que permiten conocer que la eficiencia se encuentra alrededor del 18,38%, también se pudo conocer que la temperatura y humedad del café obtenidos durante las pruebas están en el rango indicado por la recomendación seguida, estos resultados permiten asegurar el funcionamiento del prototipo implementado. Se pudieron

contrastar los resultados obtenidos a través de la realización de cálculos y a través de la fase experimental en donde se evidencio una ligera diferencia en los valores obtenidos esto debido a que no se pueden controlar variables como son la radiación solar y demás condiciones ambientales.

En lo referente a las gráficas obtenidas mediante la tabulación de los datos obtenidos a través de las pruebas, se pudo evidenciar que las curvas de temperatura del café, cámara de secado, medio ambiente y la humedad del café poseen un coeficiente de determinación cercano a uno lo cual permite afirmar que los resultados obtenidos son confiables y pueden usarse para otros proyectos. Para futuras investigaciones se puede mejorar el prototipo del secador de café en varios aspectos como el ángulo en el cual se cierra la plancha superior de la estructura Parvati con el fin de evitar que la plancha inferior de la estructura parvati siga reflejando. Así también se puede implementar un sistema de detección de lluvias.

Al final de la investigación se obtuvieron resultados que permiten conocer que la eficiencia se encuentra alrededor del 18,38%, efectuando el secado a temperaturas de 25 a 35°C con el fin de evitar el deterioro del grano, comparado con otros secadores como el de (Prada et al., 2019) que constan en la revisión bibliografía, cuyo tema se denomina “Efectividad de un Proceso de Secado de Café usando Secadores Solares con Sistema de Flujo de Aire Continuo Impulsado por Energía Fotovoltaica” en el cual se manifiesta que el secado de café se lo realizó con temperaturas comprendidas entre 42°C y 49°C con una humedad final del café del 12% obteniéndose un rendimiento del 15%. Estas diferencias entre ambos proyectos pudieron darse debido a que en el presente proyecto se tiene un control de temperatura que ayuda a mejorar el proceso de secado.

Así también en la investigación realizada por (Gutiérrez-Flórez & Copete-López, 2009) en donde se evalúa el comportamiento de un secador de café mecánico se manifiesta que en este

tipo de secado no se obtiene un control exacto de la humedad debido al secado ininterrumpido, así mismo en este tipo de secado se realiza el proceso usando altas temperaturas con el fin de acelerar el proceso, dichas temperaturas afectan a las diferentes propiedades del grano de café, de forma contraria, en el presente proyecto el proceso de secado se lo realiza de forma interrumpida y a una temperatura relativamente baja, permitiendo conservar la mayoría de propiedades del café con lo cual se obtiene una buena calidad.

8. CONCLUSIONES

- Se logró el diseño de un secador con geometría Parvati de doble ángulo de 26° y 41° el cual funciona de manera exitosa logrando disminuir la humedad del café desde el 53% al 11,3% en un tiempo de 33 días ajustándose al perfil de la recomendación sobre este tipo de proceso.
- El secador solar fue construido con tecnología y materiales existentes en la localidad, se conforma de la estructura Parvati que posee dos superficies reflectantes abatible y dos fijas, la cámara de secado de un metro de diámetro y con una capacidad de 25 kg.
- Los resultados obtenidos en forma teórica difieren especialmente en el rendimiento puesto que en el método de cálculo no se tomaron en cuenta los factores externos que modifican el comportamiento del proceso de secado. Sin embargo, en cuanto a la curva de secado se presenta una similitud considerable.
- El sistema de control mediante un ventilador fue efectivo para mantener la temperatura en un rango que evite el daño del grano de café, así como también permite tener constante la humedad en la cámara.
- Mediante la revisión teórica, la selección y el diseño de los diferentes elementos de control se realizó la construcción de un secador solar de café con geometría Parvati. Obteniéndose un rendimiento de 18.38%.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con los estudios sobre este tipo de secador para otras condiciones climáticas con el fin de evaluar su rendimiento y aplicabilidad, así como también se recomienda evaluar el comportamiento del secador con mayores cantidades de café.
- En la metodología usada realizar los ajustes necesarios para poder definir de mejor manera el fenómeno del proceso del secado con el fin de obtener resultados teóricos que se asemejen a los resultados experimentales.
- Se recomienda implementar un sistema de control más robusto y exacto que permita monitorear la mayor cantidad de variables posibles, tratando de obtener un mejor resultado en el proceso de secado.
- En la estructura Parvati se recomienda si es posible lograr el movimiento de la plancha superior e inferior de la misma. Así también una estructura que cubra a las partes superior y laterales de la cámara en caso de altos niveles de radiación.
- Se recomienda realizar pruebas con ángulos distintos de la estructura Parvati para verificar si existe una mejor calidad de secado y conseguir cantidades de radiación superiores.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Hukseflux , T. (2018). *Hukseflux Thermal Sensors*. Obtenido de <https://www.hukseflux.com/products/solar-radiation-sensors/pyranometers/sr20-d2-pyranometer>
- Aguilera, P. (2002). *Programación de PLC's*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México.
- America, S. C. (1982). *Protocolos de catación de SCAA*. Obtenido de <https://sca.coffee/>
- Balcells, J., & Romeral, J. L. (1997). *Autómatas Programables*. Barcelona, España: S.A.Marcombo.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* (Séptima Edición ed.). México: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México: McGraw-Hill.
- Coffee IQ. (2017). *Coffe IQ*. Obtenido de <https://www.coffeaiq.co/secado-de-cafe-al-sol-y-mecanico/>
- CONELEC. (2008). *Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica*. CONELEC, Quito.
- Corvalan, R., Horn , M., Roman, R., & Saravia, L. (1999). *Ingeniería del Secado Solar*.
- Díaz, M. (2014). *Gestión de la calidad durante el secado del café*.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth Edition ed.). New Jersey.
- EcuRed. (2014). *EcuRed*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Sensor_de_Humedad
- ElectroCrea. (2018). *ElectroCrea*. Obtenido de <https://electrocrea.com/products/sensor-de-temperatura-pt100-rtd-200-a-450c>
- Electronilab. (2018). *Electronilab*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/motor-paso-paso-nema-23-269-oz-in-200-pasosvuelta/>

- Factor Energía. (30 de Agosto de 2018). *Energías renovables: características, tipos y nuevos retos*. Obtenido de <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- Faires, V. M., & Simmang, C. M. (1983). *Termodinámica*. México: Hispano Americana S.A.
- Faulhaber. (2018). *Direct Industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/faulhaber/product-7023-397690.html>
- Ganadería(MAGAP), M. d. (2018). *CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTOR DE CAFÉ*. Pichincha.
- Holman, J. P. (1999). *Transferencia de Calor*. México: McGRAW HILL.
- Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias.
- Inversiones, I. d. (2013). *PRO ECUADOR*. Guayas.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (Segunda Edición ed.). San Diego, California, USA: Elsevier.
- Maldonado, J., León, M., Solórzano, B., Alvarez, O., & Montaña, T. (2015). Metodología de Análisis de tres cocinas solares, de Caja, Parvati y Combinada (Caja-Parvati).
- MIPRO. (2016). *Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café*. Pichincha.
- NASA. (Marzo de 2015). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Perez Rodriguez, C. (2011). *Caracterización de un Motor Lineal de Inducción*. Madrid.
- Ponce Vaca, L. A., Orellana Suarez, K. D., Acuña Velásquez, I. R., Alfonso Aleman, J. L., & Fuentes Figueroa, T. (Abril de 2018). Situación de la caficultura ecuatoriana: perspectivas. *Scielo*.
- Riveros, H. G., & Oliva, A. I. (28 de Agosto de 1985). Graphical Analysis of Sun Concentrating Collectors. *ScienceDirect*.
- Roa, M. G., & Álvarez, G. J. (2014). Secado del Café. En Cenicafé. Colombia.

Ruggiero, P. (Jueves de Junio de 2018). *Excelencias Gourmet*. Obtenido de <https://www.excelenciasgourmet.com/es/opinion/robusta-vs-arabica-un-producto-dos-sabores>

Salvador Escoda S.A. (2018). *Libro Blanco de las Energías Renovables*.

Torrente Artero, O. (2013). *Arduino Curso Práctico de Formación*. Madrid: Alfaomega.

Uyaguari Carrión, C. O. (2014). *Diseño, construcción y análisis funcional-experimental de una cocina solar combinada (Parvati-Tipo Caja)*.

ANEXO 1: PROGRAMACIÓN EN IDE ARDUINO

```

    // Inicialización de Librerías
#include "max6675.h"
#include "DHT.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <TimeLib.h>
#include <HX711_ADC.h>

//Definición de Pines de Sensor DHT22
#define DHTPIN1 22
#define DHTTYPE1 DHT22

//Definición de Pines de Sensor DHT11
#define DHTPIN2 24
#define DHTTYPE2 DHT11

//Definición de Pines de Módulo Micro SD
#define SSpin 53 //CS

//Declaración de Variables
int thermoD01 = 7;
int thermoCS1 = 6;
int thermoCLK1 = 5;
int thermoD02 = 4;
int thermoCS2 = 3;
int thermoCLK2 = 2;
int vent1 = 43;
int vent2 = 45;
int motorretorno = 41;
int motorsalida = 46;
int PWMV1 = 8;
int PWMV2 = 9;

```

```

int SensorDHT22 = 22;
int SensorDHT11 = 24;
int TEMPERATURADHT22;
int TEMPERATURAT1;
int TEMPERATURAT2;
int HUMEDADDHT22;
int TEMPERATURADHT11;
int HUMEDADDHT11;
int periodo = 5000;
unsigned long TiempoAhora = 0;
long T;
float i;

//Declaración de Variables de Termocuplas.
MAX6675 thermocouple1(thermoCLK1, thermoCS1, thermoDO1);
MAX6675 thermocouple2(thermoCLK2, thermoCS2, thermoDO2);

//Declaración de Pines de Alimentación para Termocuplas
int vccPin = 10;
int gndPin = 11;

//Declaración de Tipos de sensores DHT
DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE1);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE2);

//Declaración de Módulo I2C
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // si no te sale con
esta direccion puedes usar (0x3f,16,2) || (0x27,16,2)
|| (0x20,16,2)

//Inicialización de Celda de Carga
HX711_ADC LoadCell(12, 13);

```

```

//Establecimiento de Nombre de Archivo txt
File archivo;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(1000);

  //Codigo de Balanza
  Serial.println("Wait...");
  LoadCell.begin();
  long stabilisingtime = 2000; //La presición de la tara
  puede ser mejorada aumentando el tiempo unos segundos
  LoadCell.start(stabilisingtime);
  LoadCell.setCalFactor(219.5); //Factor de
  Calibración(float)
  Serial.println("Inicio + tara esta completa");

  // Pines Digitales de Salida y Entrada
  pinMode(vccPin, OUTPUT);
  pinMode(gndPin, OUTPUT);
  pinMode(motorsalida, OUTPUT);
  pinMode(motorretorno, OUTPUT);
  pinMode(PWMV1, OUTPUT);
  pinMode(PWMV2, OUTPUT);
  pinMode(vent1, OUTPUT);
  pinMode(vent2, OUTPUT);

  //Condición para que el actuador permanezca apagado
  durante el inicio
  digitalWrite(motorretorno, HIGH);
  digitalWrite(motorsalida, HIGH);

```



```

//Inicializaión de DHT22 y DHT11
dht1.begin();
dht2.begin();

//Inicialización de LCD (Pines de Comunicación de LCD
Mega2560 = 20 (SDA), 21 (SCL))
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.clear();

//Establecimiento de tiempo de inicio de mediciones
//setTime(hora,minutos,segundos,dia,mes,año)
setTime(10, 00, 00, 22, 06, 20);

//Inicialización de Tarjeta MicroSD
Serial.println("Iniciando tarjeta ..."); // texto en
ventana de monitor
if (!SD.begin(SSpin)) { // inicializacion de tarjeta
SD
  lcd.setCursor(2, 0);
  lcd.print("FALLO EN LA");
  lcd.setCursor(1, 1);
  lcd.print("INICIALIZACION");
  Serial.println("fallo en inicializacion !");// si falla
se muestra texto correspondiente y
  return; // se sale del setup() para finalizar
el programa
}
Serial.println("inicializacion correcta"); // texto de
inicializacion correcta
archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); // apertura
para lectura/escritura de archivo datos.txt

```

```

//Impresión de Variables en Documento txt
archivo.print(" "); // espacio
archivo.print("Fecha"); // escribe en tarjeta el valor
de temperatura(Temperatura en el interior de la Cámara de
Secado)
archivo.print(" "); // espacio
archivo.print("Hora"); // escribe en tarjeta el valor
de temperatura(Temperatura en el interior de la Cámara de
Secado)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("TCA1"); // escribe en tarjeta el valor
de temperatura(Temperatura en el interior de la Cámara de
Secado)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("TEX"); // escribe en tarjeta el valor de
temperatura(Temperatura en el medio Ambiente)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("TCA2"); // escribe en tarjeta el valor
de temperatura(Temperatura del Café)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("TC"); // escribe en tarjeta el valor de
temperatura(Temperatura en el interior de la Cámara de
Secado)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("HCA"); // escribe en tarjeta el valor
de humedad y salto de línea(Humedad en el interior de la
Cámara de Secado)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("HEX"); // escribe en tarjeta el valor
de humedad y salto de línea(Humedad en el Medio Ambiente)
archivo.print(" "); // escribe en tarjeta una coma
archivo.print("MS"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Alta

```

```

    archivo.print(" ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.print("ME"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Baja
    archivo.print(" ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.print("V1"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Alta
    archivo.print(" ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.print("V2"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Baja
    archivo.print(" ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.print("MC"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Baja
    archivo.print(" ");    // escribe en tarjeta una
coma
    archivo.println("HC"); //Escribe en Tarjeta Accionamiento
de Motor de Temperatura Baja
    archivo.close();      // cierre de archivo
}

```

```

void loop() {

```

```

//Inicialización de variable t de Time

```

```

    time_t t = now(); //Declaramos la variable time_t

```

```

//Inicialización de Celda de Carga

```

```

    LoadCell.update();

```

```

    //get smoothed value from data set + current calibration
factor

```

```

    if (millis() > T + 250) {

```

```

        float i = LoadCell.getData();

```

```

        Serial.print("Load_cell output val: ");

```

```

        Serial.println(i);
    }
}

```

```

    T = millis();
}

//Recepción desde el Serial
if (Serial.available() > 0) {
    float i;
    char inByte = Serial.read();
    if (inByte == 'T') LoadCell.tareNoDelay();
}

//check if last tare operation is complete
if (LoadCell.getTareStatus() == true) {
    Serial.println("Tara completa");
}

//Condicion de Termocupla para Salida de Actuador
delay(500);
if ((thermocouple1.readCelsius()) >= 30) {
    digitalWrite(motorsalida, LOW);
} else {
    digitalWrite(motorsalida, HIGH);
}

//Condicion de Termocupla para Retorno de Actuador
if ((thermocouple1.readCelsius()) <= 26) {
    digitalWrite(motorretorno, LOW);
} else {
    digitalWrite(motorretorno, HIGH);
}

//Condicion de Termocupla para encendido de Ventilador 1
if ((thermocouple1.readCelsius()) >= 35) {
    digitalWrite(vent1, LOW);
}

```

```

} else {
    digitalWrite(vent1, HIGH);
}

//Condicion de Termocupla para encendido de Ventilador 2
if ((thermocouple1.readCelsius()) >= 35) {
    digitalWrite(vent2, LOW);
} else {
    digitalWrite(vent2, HIGH);
}

//Condicion de Termocupla para apagado de Ventilador 1
if ((thermocouple1.readCelsius()) <= 30) {
    digitalWrite(vent1, HIGH);
} else {
    digitalWrite(vent1, LOW);
}

//Condicion de Termocupla para apagado de Ventilador 2
if ((thermocouple1.readCelsius()) <= 30) {
    digitalWrite(vent2, HIGH);
} else {
    digitalWrite(vent2, LOW);
}

//Inicialización de Diferentes Variables
TEMPERATURADHT22 = dht1.readTemperature(); // almacena
en variable valor leído de temperatura
TEMPERATURAT1 = thermocouple1.readCelsius(); // almacena
en variable valor leído de temperatura
TEMPERATURAT2 = thermocouple2.readCelsius(); // almacena
en variable valor leído de temperatura
HUMEDADHT22 = dht1.readHumidity(); // almacena en
variable valor leído de humedad

```

```

    TEMPERATURADHT11 = dht2.readTemperature(); // almacena
en variable valor leído de temperatura
    HUMEDADDDHT11 = dht2.readHumidity(); // almacena en
variable valor leído de humedad

//Inicialización de Variables para mostrar en LCD
float TC = thermocouple1.readCelsius();
float HC = (1-((200*(1-0.53))/(LoadCell.getData())))*100;
Serial.print("La humedad del cafe es: ");
Serial.println(HC);

//Impresión de Caracteres en LCD 16x2
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("TEMP:");
lcd.setCursor (11, 0);
lcd.print(TC, 0);
lcd.setCursor (13, 0);
lcd.print((char)223);
lcd.setCursor (14, 0);
lcd.print("C");
lcd.setCursor (0, 1);
lcd.print("HUMEDAD:");
lcd.setCursor (11, 1);
lcd.print(HC, 1);
lcd.setCursor (15, 1);
lcd.print("%");
lcd.display();

//Lectura y Escritura de Señales de Ventiladores
PWMV1 = analogRead(A1);
PWMV1 = map(PWMV1, 0, 1024, 0, 255);
analogWrite(8, PWMV1);

```

```

PWMV2 = analogRead(A0);
PWMV2 = map(PWMV2, 0, 1024, 0, 255);
analogWrite(9, PWMV2);

//Impresiones en el Monitor Serial
Serial.print("Humedad Cámara de Secado % (DHT22)");
Serial.println(HUMEDADDHT22);
Serial.print("Humedad Ambiente Exterior % (DHT11)");
Serial.println(HUMEDADDHT11);
Serial.print("Temperatura del Café");
Serial.println(TEMPERATURAT1);
Serial.print("Temperatura de la Cámara de Secado");
Serial.println(TEMPERATURAT2);
Serial.print("Temperatura del Ambiente Exterior");
Serial.println(TEMPERATURADHT11);

delay(1000);

if (millis() > TiempoAhora + periodo) {
    TiempoAhora = millis();

    Serial.println("Inicializando tarjeta ..."); // texto
en ventana de monitor
    if (!SD.begin(SSpin)) { // inicializacion de
tarjeta SD
        Serial.println("fallo en inicializacion !");// si
falla se muestra texto correspondiente y
        return; // se sale del setup() para finalizar
el programa
    }

    Serial.println("inicializacion correcta"); // texto de

```

inicializacion correcta

```
    archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); // apertura
para lectura/escritura de archivo datos.txt
```

```
    archivo.print(day(t));
```

```
    archivo.print(+ "/" ) ;
```

```
    archivo.print(month(t));
```

```
    archivo.print(+ "/" ) ;
```

```
    archivo.print(year(t));
```

```
    archivo.print("  ") ;
```

```
    archivo.print(hour(t));
```

```
    archivo.print(+ ":" ) ;
```

```
    archivo.print(minute(t));
```

```
    archivo.print(":") ;
```

```
    archivo.print(second(t));
```

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una coma
```

```
    archivo.print(TEMPERATURADHT22); // escribe en
```

tarjeta el valor de temperatura

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una
```

coma

```
    archivo.print(TEMPERATURADHT11); // escribe en
```

tarjeta el valor de temperatura

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una coma
```

```
    archivo.print(TEMPERATURAT1); // escribe en tarjeta
```

el valor de temperatura

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una coma
```

```
    archivo.print(TEMPERATURAT2); // escribe en tarjeta
```

el valor de temperatura

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una
```

coma

```
    archivo.print(HUMEDADDHT22); // escribe en tarjeta
```

el valor de humedad y salto de linea

```
    archivo.print("  "); // escribe en tarjeta una coma
```

```
    archivo.print(HUMEDADDHT11); // escribe en tarjeta
```



```

el valor de humedad y salto de linea
    if (digitalRead(motorsalida) == LOW ) {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("1"); //Escribe en Tarjeta
Accionamiento de Motor de Temperatura Alta
    } else {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("0");
    }
    if (digitalRead(motorretorno) == LOW ) {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("1"); //Escribe en Tarjeta
Accionamiento de Motor de Temperatura Baja
    } else {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("0");
    }
    if (digitalRead(vent1) == HIGH ) {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("1"); //Escribe en Tarjeta
Accionamiento de Motor de Temperatura Alta
    } else {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("0");
    }
    if (digitalRead(vent2) == HIGH ) {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una

```

```

coma
    archivo.print("1"); //Escribe en Tarjeta
Accionamiento de Motor de Temperatura Baja
    } else {
        archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una
coma
        archivo.print("0");
    }
    archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.print(LoadCell.getData());    // escribe en
tarjeta el valor de humedad y salto de linea
    archivo.print("  ");    // escribe en tarjeta una coma
    archivo.println(HC);    // escribe en tarjeta el valor
de humedad y salto de linea
    archivo.close();    // cierre de archivo
    Serial.println("escritura correcta"); // texto de
escritura correcta en monitor serie
    }
}

```

ANEXO 2:
ESQUEMA ELÉCTRICO DE
CONTROL

ANEXO 3:
NORMA ASAE S580

Testing and Reporting Solar Cooker Performance

Initiated by the Test Standards Committee at the Third World Conference on Solar Cooking (Coimbatore, Tamil Nadu, India, 9 January 1997); further input from the Third Latin American Congress on Solar Cookers (La Ceiba, Atlántico, Honduras, March 2001); final development by the ASAE Solar Energy Committee SE-414 March 2002; approved by the ASAE Structures and Environment Division Standards Committee January 2003.

1 Purpose and scope

1.1 This Standard is intended to:

1.1.1 Promote uniformity and consistency in the terms and units used to describe, test, rate, and evaluate solar cookers, solar cooker components, and solar cooker operation.

1.1.2 Provide a common format for presentation and interpretation of test results to facilitate communication.

1.1.3 Provide a single measure of performance so consumers may compare different designs when selecting a solar cooker.

1.2 The scope of this Standard includes:

1.2.1 All solar powered batch-process food and water heating devices (solar cookers). Devices designed to desiccate (dryers) are not covered.

1.2.2 Within the scope of this Standard a solar cooker shall be understood to include the cooking vessel(s) together with associated supporting, heat transfer and heat retention surfaces, heat storage and transfer media and associated pumps and controls, light transmitting and reflecting surfaces, and all associated adjustments, supports, and solar locating and tracking mechanisms as may be integral parts of a particular solar cooker.

2 Normative References

Indian Standard IS 13429, 1992, *Solar Cooker- (3 Parts)*.

3 Terminology

3.1 **Absorber plate:** Darkened surface converting light energy into thermal energy.

3.2 **Angle, Azimuth:** The angular displacement from south of the projection of beam radiation on the horizontal plane.

3.3 **Angle, Zenith:** The angle subtended by a vertical line to the zenith (point directly overhead) and a line directly to the sun.

3.4 **Beam Radiation:** Solar radiation received directly from the sun without atmospheric scattering.

3.5 **Box-type cooker:** A solar cooker with a well-insulated volume for the cooking vessel(s), typical designs having from zero to four plane mirrors.

3.6 **Concentrating-type cooker:** Any of various designs characterized by multiple planes or curved reflective surfaces. Many designs lack insulated walls but have large intercept areas to compensate for their comparatively greater heat loss.

3.7 **Intercept area:** The sum of the reflector and aperture areas projected onto the plane perpendicular to direct beam radiation (Figure 1). For convenience, use the average beam radiation zenith angle as calculated for the entire test period.

3.8 **Load:** The mass of water being heated by the solar cooker.

3.9 **Test:** All events and data comprising the measured solar heating of water in a device intended to cook food.

3.10 **Tracking:** Rotating the cooker in the horizontal plane to

compensate for azimuth angle changes (box-type) or following the sun in two dimensions (concentrating-type).

4 General

4.1 This Standard specifies that test results be presented as cooking power, in Watts, normalized for ambient conditions, relative to the temperature difference between cooker contents and ambient air, both as a plot and as a regression equation for no fewer than 30 total observations over three different days.

4.2 This Standard specifies that cooking power be presented as a single number found from the equation described in section 4.1 for a temperature difference of 50 °C.

5 Uncontrolled (weather) variables

5.1 **Wind.** Tests shall be conducted when wind is less than 1.0 m/s, measured at the elevation of the cooker being tested and within ten meters of it. Should wind exceed 2.5 m/s for more than ten minutes, discard that test data. If a wind shelter is required, 1) it shall be designed so as to not interfere with incoming total radiation and 2) the wind instrumentation shall be co-located with the cooker in the same wind shadow.

5.2 **Ambient temperature.** Tests should be conducted when ambient temperatures are between 20 and 35 °C.

5.3 **Water temperature.** Test data shall be recorded while cooking vessel contents (water) are at temperatures between 5 °C above ambient and 5 °C below local boiling temperature.

5.4 **Insolation.** Available solar energy shall be measured in the plane perpendicular to direct beam radiation (the maximum reading) using a radiation pyranometer. Variation in measured insolation greater than 100 W/m² during a ten-minute interval, or readings below 450 W/m² or above 1100 W/m² during the test shall render the test invalid. For convenience, the pyranometer may be fixed on the cooker at the average beam radiation zenith angle as calculated for the entire test period.

5.5 **Solar zenith and azimuth angle.** Tests should be conducted between 10:00 and 14:00 solar time. Exceptions necessitated by solar variability or ambient temperature shall be specially noted.

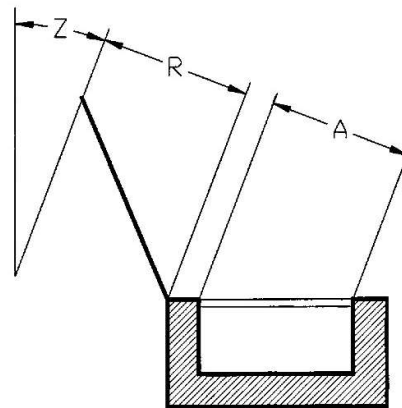


Figure 1 – Determining the intercept area. Reflector area is reflector width times its apparent height, R, and aperture area is aperture width times its apparent height, A. Apparent height is the shadow or projected height in the plane perpendicular to beam radiation of zenith angle Z.

6 Controlled (cooker) variables

6.1 Loading. Cookers shall have 7,000 grams potable water per square meter intercept area distributed evenly between the cooking vessels supplied with the cooker. If no cooking vessels are provided, inexpensive aluminum cooking vessels painted black shall be used.

6.2 Water mass. The mass of water should be determined with an electronic balance to the nearest gram using a pre-wetted container.

6.3 Tracking. Azimuth angle tracking frequency should be appropriate to the cooker's acceptance angle. Box-type cookers typically require adjustment every 15 to 30 minutes or when shadows appear on the absorber plate. Concentrating-type units may require more frequent adjustment to keep the solar image focused on the cooking vessel or absorber. With box-type cookers, zenith angle tracking may be unnecessary during a two hour test conducted at mid-day. Testing should be representative of local conditions, *ie*: how the typical consumer is expected to use the cooker.

6.4 Temperature sensing. Water and air temperature should be sensed with thermocouples. Each thermocouple junction shall be immersed in the water in the cooking vessel(s) and secured 10 mm above the bottom, at center. Thermocouple leads should pass through the cooking vessel lid inside a thermally nonconductive sleeve to protect the thermocouple wire from bending and temperature extremes. The sleeve should be secured with 100% silicone caulk to reduce water vapor loss.

7 Test protocol

7.1 Recording. The average water temperature (C) of all cooking vessels in one cooker shall be recorded at intervals not to exceed ten minutes, and should be in units of Celsius to the nearest one tenth of a degree. Solar insolation (W/m^2), ambient temperature (C), and wind speed (m/s) shall be recorded at least as frequently. Record and report the frequency of attended (manual) tracking, if any. Report azimuth angle(s) during the test. Report the test site latitude and the date(s) of testing.

7.2 Calculating cooking power. The change in water temperature for each ten-minute interval shall be multiplied by the mass and specific heat capacity of the water contained in the cooking vessel(s). This product shall be divided by the 600 seconds contained in a ten-minute interval, as:

$$P_i = (T_2 - T_1)MC_v / 600$$

where:

P_i = cooking power (W)
 T_2 = final water temperature
 T_1 = initial water temperature
 M = water mass (kg)
 C_v = heat capacity(4186 J/[kg·K])

7.3 Calculating interval averages. The average insolation, average ambient temperature, and average cooking vessel contents temperature shall be found for each interval.

7.4 Standardizing cooking power. Cooking power for each interval shall be corrected to a standard insolation of $700 W/m^2$ by multiplying the interval observed cooking power by $700 W/m^2$ and dividing by the interval average insolation recorded during the corresponding interval.

$$P_s = P_i(700/I_i)$$

where:

P_s = standardized cooking power (W)
 P_i = interval cooking power (W), as calculated in section 7.2
 I_i = interval average solar insolation (W/m^2)

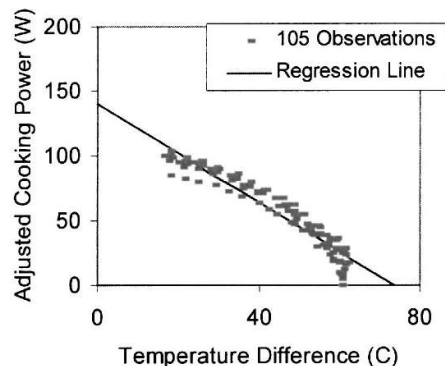


Figure 2 – Example of adjusted cooking power plotted over temperature difference and the resulting regression line. In this example the equation is: $P_s = 140 - 1.9 T_d$, with $r^2 = 0.90$. In this example the standard cooking power for a $50^\circ C$ temperature difference is: $P_{s(50)} = 45 W$.

7.5 Temperature difference. Ambient temperature for each interval is to be subtracted from the average cooking vessel contents temperature for each corresponding interval.

$$T_d = T_w - T_a \quad (3)$$

where:

T_d = temperature difference (C)
 T_w = water temperature (C)
 T_a = ambient air temperature (C)

7.6 Plotting. The standardized cooking power, P_s , (W) is to be plotted against the temperature difference, T_d , (C) for each time interval.

7.7 Regression. A linear regression of the plotted points shall be used to find the relationship between cooking power and temperature difference in terms of intercept a (W) and slope b (W/C) or $P_s = a + b T_d$. No fewer than 30 total observations from three different days shall be employed. The coefficient of determination (r^2) or proportion of variation in cooking power that can be attributed to the relationship found by regression should be higher than 0.75 or specially noted.

7.8 Single measure of performance. The value for standardized cooking power, P_s , (W) shall be computed for a temperature difference, T_d , of $50^\circ C$ using the regression relationship found according to section 7.7.

NOTE: for product labeling and sales literature an independent laboratory using a statistically adequate number of trials shall determine this number. While this value, like the fuel economy rating of an automobile, is not a guarantee of performance, it provides consumers with a useful tool for comparison and product selection.

7.9 Reporting. A plot of the relationship between standardized cooking power and temperature difference shall be presented with the equation, following the example in Figure 2. The report shall also state the standardized cooking power at a temperature difference of $50^\circ C$.

References

Funk, P.A. 2000. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Solar Energy* 68(1):1-7.
 Mullick S.C., Kandpal T.C., and Saxena A.K. 1987. Thermal test procedure for box-type solar cookers. *Solar Energy* 39(4):353-360.

ANEXO 4:
TABLA DE PROPIEDADES
DEL AIRE

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

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

ANEXO 5:
CONSTRUCCIÓN DEL
SECADOR DE CAFÉ



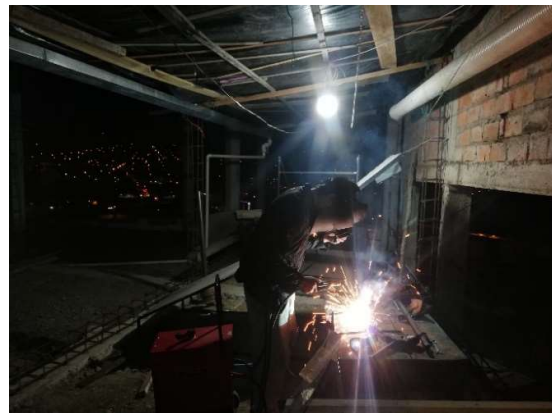
Construcción de Cámara de Secado



Torneado de Poleas



Taladrado de Agujeros



Soldadura de Estructura Parvati



Construcción de Estructura Parvati



Soporte de Cámara de Secado

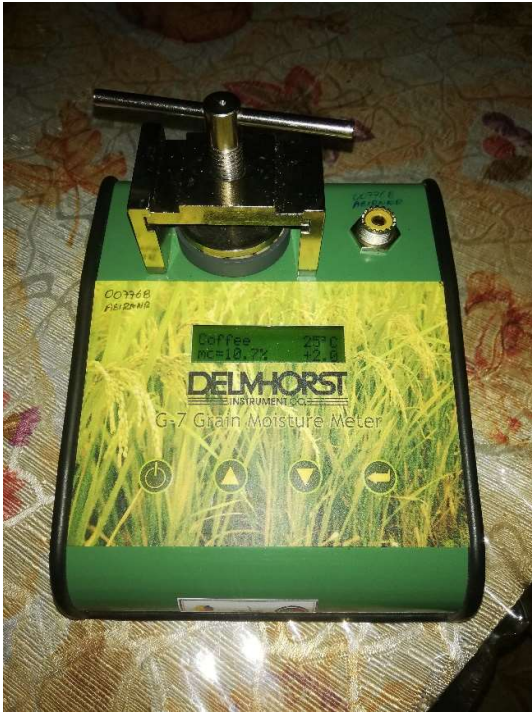
ANEXO 6:
SECADOR DE CAFÉ
CONSTRUIDO



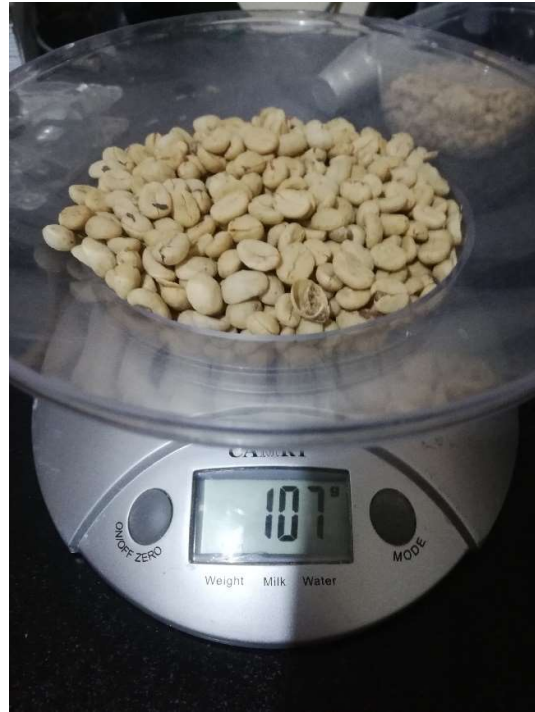


ANEXO 7:
COMPONENTES DE
CONTROL

Anexo 3: Fotografías de Componentes usados para el Control del Secador de Café.



Medidor de Humedad de Café



Balanza Digital



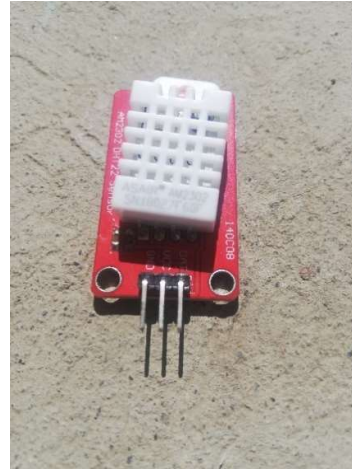
Ventilador de 190 CFM



Actuador Lineal



Ventilador de 50 CFM



Sensor DHT22



Balanza para Monitoreo



Termocupla tipo K

ANEXO 8:
FICHA TÉCNICA DE
VENTILADOR



COMMONWEALTH AC AXIAL FAN

FP-108EXM

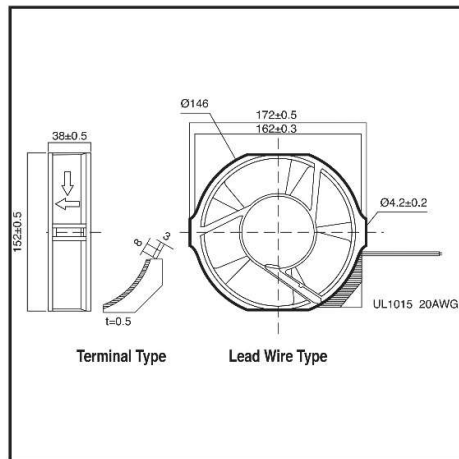
172x150x38mm



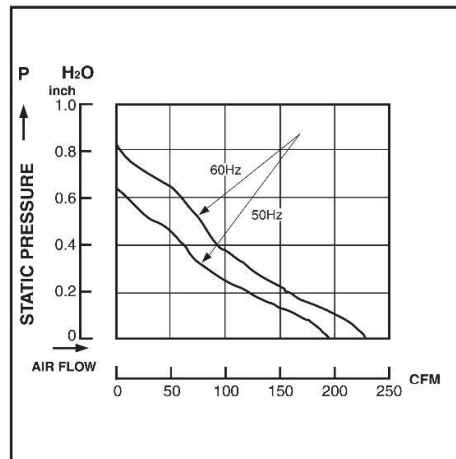
DESIGN FEATURES

- *BEARING SYSTEM: BALL BEARING
- *IMPELLER: PLASTIC WITH FIBER GLASS FILLED UL 94V-0
- *HOUSING: DIE CAST ALUMINUM PAINTED BLACK OR NATURAL COLOR
- *MOTOR: SHADE POLE MOTOR
- *PROTECTION: THERMAL PROTECTION & IMPEDANCE PROTECTION
- *CONNECTING: WIRE LEADS & TERMINAL
- *OTHER VOLTAGE: 24,48,100,380 V AC (50/60Hz) ARE AVAILABLE

DIMENSIONS:MM



PERFORMANCE

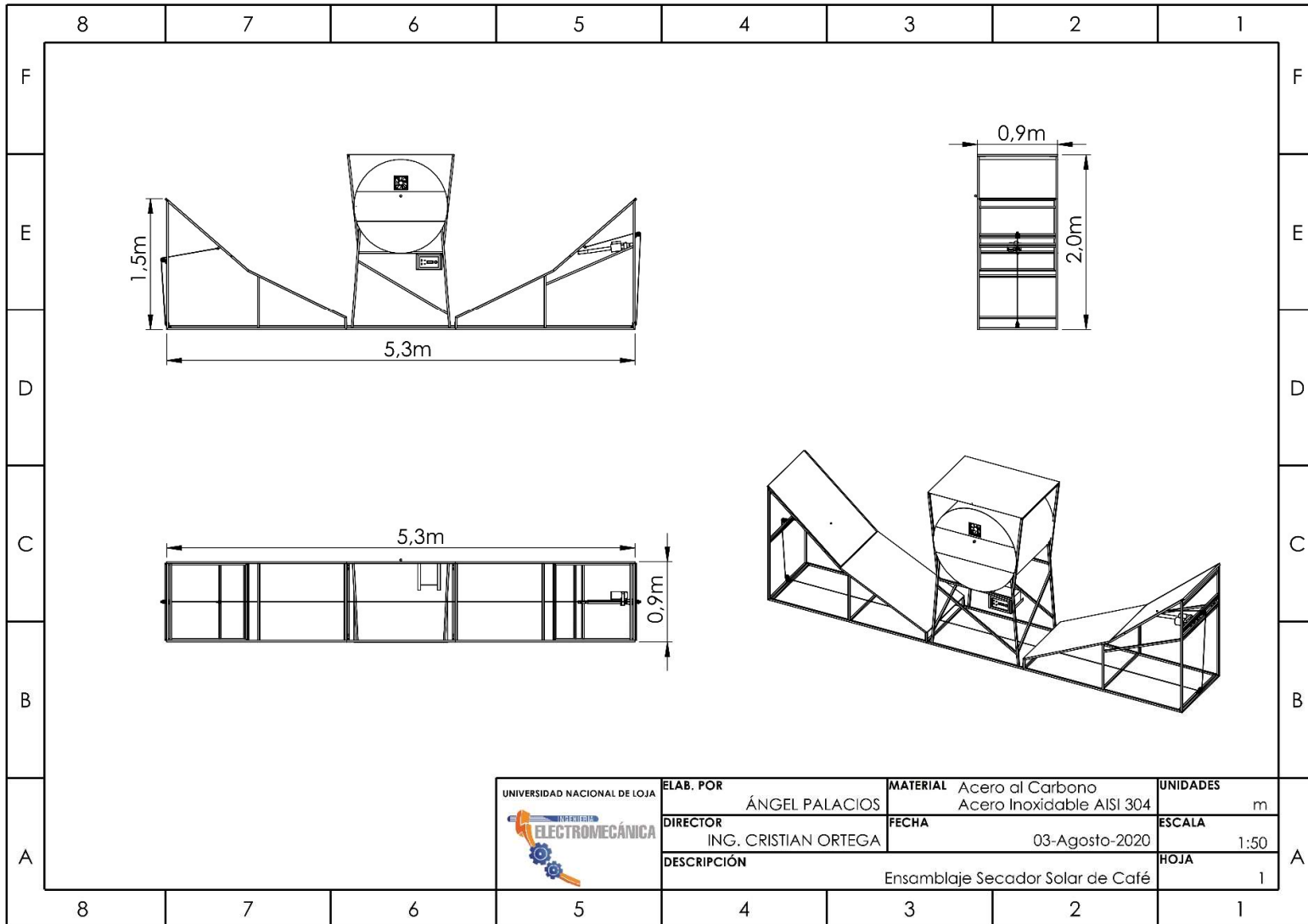


SPECIFICATIONS

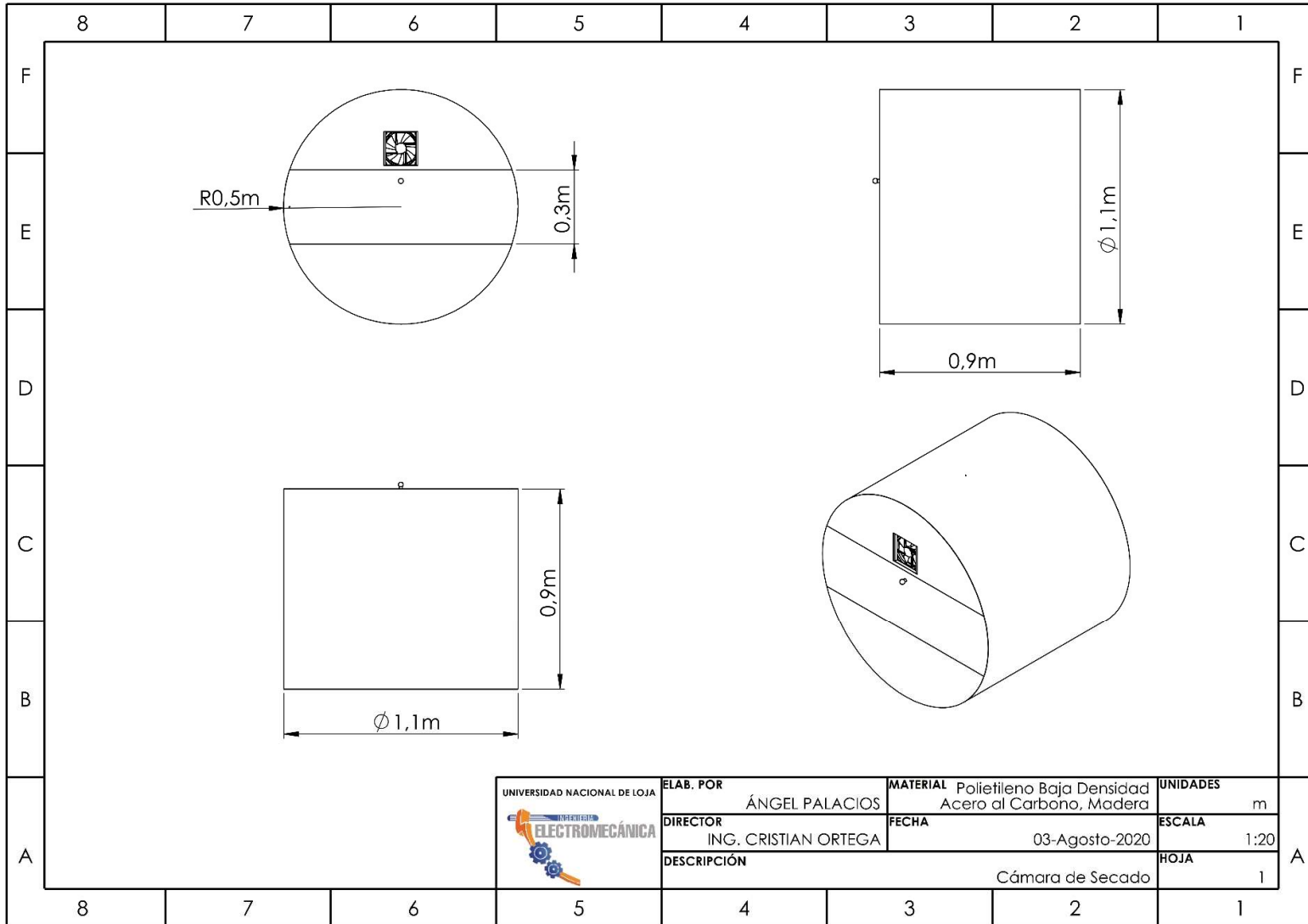
Specifications are subject to change without notice

MODEL NO.	VOLT (VAC)	FREQUENCY (HZ)	AIR (CFM)	VOLUME (M ³ /MIN)	CURRENT (A)	POWER (W)	SPEED (RPM)	STATIC PRESSURE (INCH-H ₂ O)	NOISE (dBA)
FP-108EXM	110/120	50/60	205/230	5.80/6.50	0.40/0.40	30/28	2700/2900	0.75/0.60	49
FP-108EXM	220/240	50/60	205/230	5.80/6.50	0.28/0.23	38/35	2700/2900	0.75/0.60	49

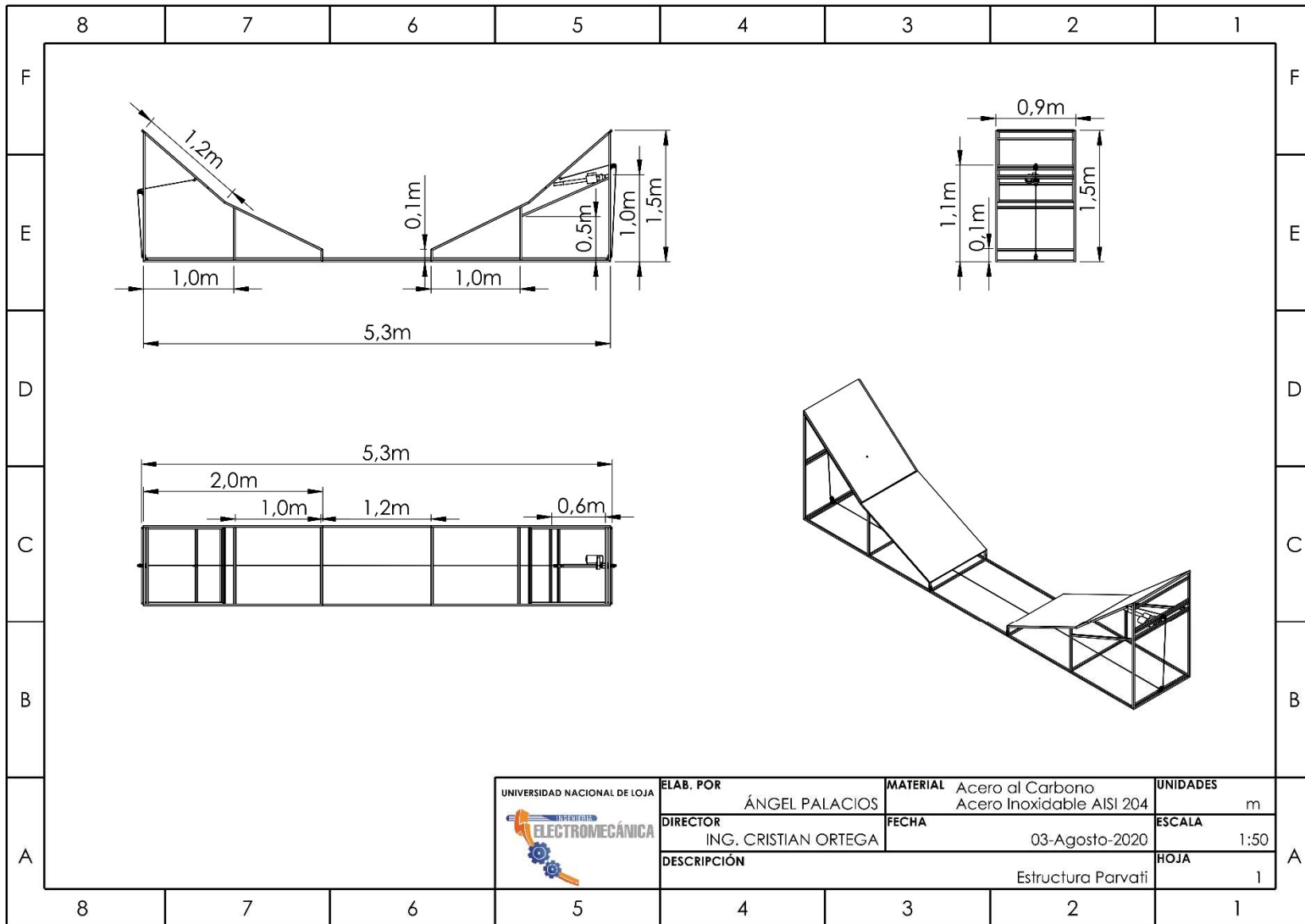
ANEXO 9:
REPRESENTACIÓN
TÉCNICA DEL SECADOR



	ELAB. POR	ÁNGEL PALACIOS	MATERIAL	Acero al Carbono Acero Inoxidable AISI 304	UNIDADES	m
	DIRECTOR	ING. CRISTIAN ORTEGA	FECHA	03-Agosto-2020	ESCALA	1:50
	DESCRIPCIÓN	Ensamblaje Secador Solar de Café			HOJA	1



	ELAB. POR	ÁNGEL PALACIOS	MATERIAL	Polietileno Baja Densidad Acero al Carbono, Madera	UNIDADES	m	
	DIRECTOR	ING. CRISTIAN ORTEGA	FECHA	03-Agosto-2020	ESCALA	1:20	
	DESCRIPCIÓN	Cámara de Secado				HOJA	1



	ELAB. POR	ÁNGEL PALACIOS	MATERIAL	Acero al Carbono Acero Inoxidable AISI 204	UNIDADES	m	
	DIRECTOR	ING. CRISTIAN ORTEGA	FECHA	03-Agosto-2020	ESCALA	1:50	
	DESCRIPCIÓN	Estructura Parvati				HOJA	1

