

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



**Diseño y construcción de un secador solar indirecto de placa absorbadora
circular para evaluar su eficiencia en el secado de arandanos**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN ENERGÍA

Autores:

Bach. Arce Flores, Jhorman Kennedy

Bach. Sánchez Pimentel, Julio César

Asesor:

M.Sc. Montañez Montenegro, Carlos Macedonio

DNI: 42451038

Código ORCID:0000-0002-8439-4734

Nuevo Chimbote- Perú

2025

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D N°492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

TÍTULO DE TESIS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO
DE PLACA ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU
EFICIENCIA EN EL SECADO DE ARANDANOS**

Autor(es)

Bach. Jhorman Kennedy Arce Flores

Bach. Julio César Sánchez Pimentel


M.Sc. Carlos Macedonio Montañez Montenegro
DNI: 42451038

Código ORCID:0000-0002-8439-4734

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN



ACTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para obtener el grado académico de Bachiller y Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D N° 580-2022-CU-R-UNS), titulado:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO DE PLACA
ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU EFICIENCIA EN EL SECADO DE
ARANDANOS**

Autores:

Bach. Jorman Kennedy Arce Flores

Bach. Julio Cesar Sánchez Pimentel

Revisado y evaluado por el siguiente jurado Evaluador

Dr. Gilmer Juan Lujan Guevara
Presidente
Código ORCID:0000-0003-4619-3795
DNI:32823443

M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres
Integrante

Código ORCID: 0000-0002-0210-5565
DNI:32913914

Mg. Robert Fabian Guevara Chinchayán
Secretario

Código ORCID:0000-0002-3579-3771
DNI: 32788460



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección E.P. de Ingeniería en Energía

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 a.m., del día lunes 28 del mes de abril del año dos mil veinticinco, en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 182-2023-UNS-CFI** de fecha 20.03.23., integrado por los siguientes docentes:

- | | | |
|--|---|------------|
| ➤ Dr. Gilmer Juan Luján Guevara | : | Presidente |
| ➤ Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán | : | Secretario |
| ➤ M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres | : | Integrante |

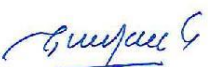
Y según la **Resolución Decanal N°118-2025-UNS-FI de fecha 31.03.25.**, se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO DE PLACA ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU EFICIENCIA EN EL SECADO DE ARÁNDANOS"**, perteneciente a los bachilleres: **SANCHEZ PIMENTEL JULIO CESAR** con código de matrícula N°201111015 y **ARCE FLORES JHORMAN KENNEDY** código de matrícula N°0201111003, teniendo como asesor al docente **M.Sc. Carlos Macedonio Montañez Montenegro**, según Resolución Decanal N°316-2021-UNS-FI de fecha 25.06.21.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ARCE FLORES JHORMAN KENNEDY	DIECISIETE (17)	BUENO

Siendo las 11:30 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Dr. Gilmer Juan Luján Guevara
PRESIDENTE


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
SECRETARIO


M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres
INTEGRANTE



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección E.P. de Ingeniería en Energía

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 11:00 a.m., del día lunes 28 del mes de abril del año dos mil veinticinco, en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 182-2023-UNS-CFI** de fecha 20.03.23., integrado por los siguientes docentes:

- Dr. Gilmer Juan Luján Guevara : Presidente
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Secretario
- M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres : Integrante

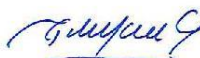
Y según la **Resolución Decanal N°118-2025-UNS-FI** de fecha 31.03.25., se **DECLARA EXPEDITO** a los bachilleres para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO DE PLACA ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU EFICIENCIA EN EL SECADO DE ARÁNDANOS"**, perteneciente a los bachilleres: **SANCHEZ PIMENTEL JULIO CESAR** con código de matrícula **N°201111015** y **ARCE FLORES JHORMAN KENNEDY** código de matrícula **N°0201111003**, teniendo como asesor al docente **M.Sc. Carlos Macedonio Montañez Montenegro**, según Resolución Decanal N°316-2021-UNS-FI de fecha 25.06.21.

Terminada la sustentación del bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
SANCHEZ PIMENTEL JULIO CESAR	DIECISIETE (17)	BUENO

Siendo las 11:30 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Dr. Gilmer Juan Luján Guevara
PRESIDENTE


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
SECRETARIO


M.Sc. Hugo Rolando Calderón Torres
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Julio Cesar Sanchez Pimentel
Título del ejercicio: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECT...
Título de la entrega: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECT...
Nombre del archivo: TESIS-ARCE_Y_SANCHEZ_FINAL_2025_UN_S_TURNITIN.pdf
Tamaño del archivo: 2.31M
Total páginas: 83
Total de palabras: 11,122
Total de caracteres: 49,312
Fecha de entrega: 02-jun.-2025 09:55a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2690643318

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA

 **UNS**
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

INFORME DE TESIS PARA TÍTULO
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO
DE PLACA ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU
EFICIENCIA EN EL SECADO DE ARANDANOS

PARA OBTENER EL TÍTULO O DIPLOMACIÓN DE INGENIERO EN ENERGÍA

Autor:
Dr. Alconim Kennedy Anas Torres
Dr. Julio Cesar Sánchez Pimentel

Asesor:
M. Sc. Carlos Moisés Gómez Montenegro
DNI: 42451038
Código CRICIE: 000-002-0438-473/
Nuevo Chimbote - Perú
2023

Derechos de autor 2025 Turnitin. Todos los derechos reservados.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO DE PLACA ABSORBEDORA CIRCULAR PARA EVALUAR SU EFICIENCIA EN EL SECADO DE ARANDANOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

23% INDICE DE SIMILITUD	23% FUENTES DE INTERNET	1% PUBLICACIONES	13% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------	---------------------------------------

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	6%
2	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	5%
3	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	4%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
5	rinacional.tecnm.mx Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante	1%
9	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1%

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios, por su guía y fortaleza constante. A mis padres, en especial a mi madre Leticia Pimentel: su legado y amor siempre me acompañan. A mi esposa, mi apoyo incondicional. A mi hijo, mi mayor inspiración. Y a toda mi familia: este logro es fruto de su cariño y este triunfo también pertenece a ustedes.

J.C.S.P

Ante todo, a Dios, por su guía constante, sabiduría y bendición en cada paso recorrido. A toda mi familia: gracias por su apoyo incondicional, paciencia y ánimo en los momentos difíciles. Este logro es fruto de sus enseñanzas y cariño, y también es de ustedes

A.FJ.K

Índice

Resumen	xiv
ABSTRACT	xv
CAPITULO I: INTRODUCCION	16
1.1 Antecedentes	17
1.2 Realidad problemática	19
1.3 Formulación del problema	19
1.4 Objetivos	19
1.5 Hipótesis de la investigación	20
1.6 Importancia y justificación del estudio	20
1.7 Limitaciones de la investigación	20
CAPITULO II: MARCO TEORICO	21
2.1 Marco teórico	22
CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS	33
3.1 Materiales	34
3.2 Método de trabajo	35
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	37
4.1 Diseño de carga y dimensiones	38
4.2 Cantidad de agua deshidratada	39
4.3 Balance de calor en el secador	40
4.4 Calor latente de vaporización	40
4.5 Coeficiente de convección externo	41
4.6 Pérdida de calor en el secador	42
4.7 Resistencia externa de calor en convección	43
4.8 Calor perdido por resistencia de conducción	44
4.9 Calor de calentamiento de bandeja	44
4.10 Irradiación solar	45
4.11 Potencia térmica del secador	46
4.12 Área efectiva de secado	46
4.13 Curva de proceso de secado	49
5. Discusiones	60
6. Conclusiones	63
7. Recomendaciones	64
8. Referencias bibliográficas	65

Lista de figuras y gráficas

Fig.1.Espectro de radiación térmica	22
Fig.2 Reflectancia, absorbancia y transmitancia	24
Fig 3. Curva de velocidad de secado	25
Fig.4 Curva de contenido de humedad en materiales	26
Fig.5 Carta psicrométrica	28
Fig.6 Clasificación se secadores solares	29
Fig.7 Secador solar de convección natural	30
Fig.8 Secador solar indirecto	30
Fig.9 Secador solar mixto de convección forzada	31
Fig.10 Secador solar directo de convección forzada	31
Fig.11 Gráfica de cambios que ocurren en alimentos según humedad	32
Fig.12 Listones de madera	34
Fig.13 Vidrio simple y doble	34
Fig.14 Pegamento o cola de carpintero	34
Fig.15 Bisagras	34
Fig.16 Medidor de radiación solar	35
Fig.17 Muestra de arándanos azul para secado	36
Fig.18 Área o superficie de bandeja	38

Lista de tablas

Tabla 1. Variación de peso de la primera muestra	49
Tabla 2. Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 1	50
Tabla 3. Variación de peso de la primera muestra	51
Tabla 4. Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 2	52
Tabla 5. Variación de peso de la primera muestra	53
Tabla 6. Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 3	54
Tabla 7. Variación de peso de la primera muestra	55
Tabla 8. Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 4	56
Tabla 9. Variación de peso de la primera muestra	57
Tabla 10. Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 5	58

Gráficas

Gráfica 1. Curva de secado de muestra 1	49
Gráfica 2. Flux de secado(g/hm ²) para muestra 1	50
Gráfica 3. Curva de secado de muestra 2	51
Gráfica 4. Flux de secado(g/hm ²) para muestra 2	52
Gráfica 5. Curva de secado de muestra 3	53
Gráfica 6. Flux de secado para muestra 3	54
Gráfica 7. Curva de secado de muestra 4	55
Gráfica 8. Flux de secado para muestra 4	56
Gráfica 9. Curva de secado de muestra 5	57
Gráfica 10. Flux de secado para muestra 5	58
Gráfica 11. Eficiencia de secado	59

.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un secador solar indirecto de placa absorbidora circular para evaluar su eficiencia en el secado de arándanos haciendo uso de las condiciones de radiación solar disponible en la localidad de Nuevo Chimbote.

La metodología empleada consistió en la aplicación de los fundamentos del balance de masa y energía considerando una masa de aire circundante que ingresa al interior del absorbedor circular y que se calienta hasta reducir su densidad alcanzando una temperatura óptima para el secado en una cabina de 0.65m x 0.75m x 1.75m. y está compuesta de una bandeja de 0.65m x 0.75m.

Los resultados del experimento se de secado indican que para una masa de 2.5 kg de arándanos secados con una calor promedio absorbido de 297.823 kJ y con una irradiación solar mensual de 6760.535 Wh/m², la velocidad de aire circundante para la base del absorbedor fue de 0.52 m/s calculándose que el calor en el absorbedor es de 297.823 kJ y la humedad final de las cinco muestras de 2.5 kg cada una secadas durante 5 días continuos es de muestra 1, 29.4%, muestra 2 225.3%, muestra 3, 29.9% , muestra 4, 31.8% y muestra 5, 31.1%.

La eficiencia de secado para cada muestra equivale a 77.5%, 66.9%, 79%, 81.1 % y 81.9% respectivamente, la eficiencia promedio de secado es 77.28 %

Palabras clave: secador, absorbedor circular, arándanos, humedad final

Abstract

The objective of this research was to design and build an indirect solar dryer with a circular absorber plate to evaluate its efficiency in drying blueberries using the solar radiation conditions available in the town of Nuevo Chimbote

The methodology used consisted of the application of the fundamentals of mass and energy balance considering a mass of surrounding air that enters the interior of the circular absorber and is heated until its density is reduced, reaching an optimal temperature for drying in a 0.65mx0 cabin. .75m x1.75m. and is composed of a 0.65m x 0.75m tray.

The results of the drying experiment indicate that for a mass of 2.5 kg of dried blueberries with an average absorbed heat of 297.823 kJ and with a monthly solar irradiation of 6760.535 Wh/m², the surrounding air velocity for the base of the absorber was 0.52 m/s, calculating that the heat in the absorber is 297.823 kJ and the final humidity of the five samples of 2.5 kg each dried for 5 continuous days is sample 1, 29.4%, sample 2, 25.3%, sample 3, 29.9%, sample 4, 31.8% and sample 5, 31.1%.

The drying efficiency for each sample is equivalent to 77.5%, 66.9%, 79%, 81.1% and 81.9% respectively, the average drying efficiency is 77.28%.

Keywords: dryer, circular absorber, blueberries, final humidity

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Solari, R (2018), en su tesis titulada” Uso de deshidratador solar para mejorar la productividad en la elaboración de mango deshidratado en el AA.HH. Manuel Dulanto, 2018”, tiene como objetivo mejorar la productividad en la elaboración de mango deshidratado, y los objetivos específicos se orientaron a determinar la influencia del uso del deshidratador en las características de calidad del producto, el tipo de investigación es experimental y su método utilizado fue la observación y análisis. Las conclusiones de la investigación indican que la eficiencia de productividad mejoro en 12.5%, y el proceso de deshidratado mejoro en un 12.75%, además concluye que el equipo tiene una vida media para uso de 18 meses y en cuanto a la calidad del deshidratado se mejoró en 6.7%.

Landa, L(2019), en su tesis titulada” Diseño, construcción y evaluación de un secador indirecto para comunidades rurales de Tarma”, propuso como objetivo general, diseñar , construir y evaluar un secador solar para el proceso de secado de los productos agropecuarios de calidad en las comunidades rurales de Tarma, y sus objetivos específicos se orientaron a su primera etapa diseñar el secador solar, luego construir el secador solar y determinar los parámetros de secado , asimismo determinar las características fisicoquímicas de las muestras a secar y luego evaluar el secador determinando su velocidad de secado y eficiencia para especies como manzanilla y cedrón, el método de investigación empleado consistió en la observación usando el método de análisis fisicoquímico con soporte en la instrumentación química , además su nivel sostiene que su tipo de investigación es básica .Los resultados obtenidos indican que las dimensiones del secador corresponde afondo 0.50 m , ancho 0.50m y 0.50 m de altura , luego el análisis fisicoquímico proximal determino su humedad final entre 12 a 13%.

Mamani, J. (2015), en su tesis titulada” Determinación comparativa de tiempo de secado de café (*Coffea arábica* L.) en dos tipos de secadores solares en el valle de Sandia –Puno”, tuvo como objetivo general comparar el tiempo de secado en el café empleando dos tipos de secadores solares, asimismo los objetivos específicos corresponden a evaluar los secadores solares con colector y sin colector solar, además de la variación de la humedad en el tiempo. El tipo de investigación corresponde a experimental y por su finalidad aplicada, se usó además en método estadístico para dar

tratamiento a los datos mediante procedimiento Anova con el software Statgraphics centurión. Los resultados obtenidos consistieron en que el equipo secador solar con colector alcanzó una temperatura de 51 °C y se redujo la humedad hasta en 12% en un tiempo de 3 días, además se comparó los atributos y propiedades del café donde la muestra 1 obtuvo un puntaje de 8.58 catalogado como excelente frente a la muestra 2 cuyo secador no tenía colector solar alcanzando solo 8.00.

Ángeles, D. (2007). En su tesis titulada "Diseño y construcción de un secador solar", tiene como objetivo general diseñar y construir un secador solar y los objetivos específicos se orientaron a desarrollar la secuencia de cálculos para estimar el tiempo de secado de frutas y hortalizas, asimismo seleccionar el material para construir el secador y luego construirlo. El tipo de investigación corresponde al experimental y por su finalidad es aplicada, utilizo el análisis estadístico para procesar la información. Los resultados indican que se hizo correctamente la secuencia de cálculo del secador, además el diseño produjo un tiempo de secado de 11.3 h para zanahorias y nopal, además el secador diseñado tiene un área de 12 m², con una capacidad de secado de 95 Kg de nopal.

De la Torre, J y Portilla, M (2015). En su tesis titulada "Diseño y construcción de un prototipo de secador solar para el Capsicum annum (Ají) con colector-almacenador de lecho en rocas con una capacidad de 25Kg, propuso como objetivo general diseñar y construir un prototipo de secador solar indirecto y con convección natural para secado del Capsicum annum(ají), y los objetivos específicos correspondieron a determinar el tiempo de secado y la humedad final que alcanza el producto. El método empleado corresponde al cuantitativo y se considera una investigación mixta, y por su finalidad aplicada. Los resultados de la investigación concluyen que la humedad inicial del ají es del 87% y respecto del valor deseable para su humedad final corresponde entre 8 a 10%, el tiempo mínimo de secado es de 33 horas empleando una energía de 63 145.3 kJ.

Sanchez, L. (2021), en su tesis. Actividad de agua de arándanos deshidratados por método combinados osmosis-aire caliente, tuvo como objetivo determinar la actividad de agua de arándanos deshidratados por osmosis y secado con aire caliente, el método de investigación consistió en el experimental completo aleatorio de dos factores y en tres niveles para cada uno de los factores. a deshidratación osmótica se trabajó con un agente

osmótico de 55, 60 y 65 °brix de concentración y a 45, 60 y 65 °C de temperatura del agente osmótico, y durante un tiempo de cinco horas, luego se sometió a un secado con aire caliente, para su posterior medida de la actividad de agua. A 45°C, a 60 y 65°brix se logró mayor pérdida de humedad (3.945Kg agua/Kg ss). Los valores óptimos en el proceso de deshidratación osmótica fueron a 52,5 °C y a 60 °brix de agente osmótico, logrando una ganancia de sólidos solubles de 22.10 y la pérdida de humedad de 3.733 (Kg agua/Kg ss), y lograr un producto final de 24,325 de grados °brix de producto final. En el proceso de secado por aire caliente la concentración y la temperatura del agente osmótico influyen directamente en la pérdida de humedad, a 50 °C y 65 °brix se produce mayor pérdida de humedad aproximadamente 1.87 (Kg agua/Kg ss).

1.2 Formulación del problema

¿Cuáles son los parámetros de diseño de un secador solar de placa absorbidora circular que permite obtener una alta eficiencia en el secado de arándanos?

1.3 Objetivo general

Diseñar y construir un secador solar indirecto de placa absorbidora circular para evaluar su eficiencia en el secado de arándanos.

1.4 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de calor absorbido por el sistema en base a la información de radiación solar disponible.
- Definir la configuración y dimensiones del área del absorbedor solar circular para almacenamiento térmico.
- Caracterizar velocidad, flujo másico de aire caliente y el calor en el sistema con carga.
- Calcular la eficiencia, velocidad y la humedad final de secado del producto.

1.5 Hipótesis

La eficiencia del secador solar indirecto de placa absorbidora circular, diseñado y construido para secar arándanos es de 50%.

1.6 Justificación y limitaciones del trabajo

1.6.1 Justificación

La presente investigación se justifica desde tres aspectos, la primera de investigación o contenido de información que se obtendrá a partir del estudio de una configuración de absorbedor circular que dispone una geometría de mayor ventaja y área y la influencia que tendrá en el rendimiento de secado en el equipo. También se justifica desde el aspecto de la economía de la operación, considerando que es un equipo diseñado y construido para utilizarse en los sectores agro productivos de la zona local asimismo se considera que los arándanos deshidratados tienen una preferencia en el mercado que hace viable su producción a través de los equipos de secado solar.

Además el uso de secadores solares resultan ser ecológicamente sostenibles debido a que operan con la radiación proveniente del sol, la cual se capta y distribuye alrededor de la cabina de secado ,el proceso de secado no genera residuos más que solo la extracción de humedad o agua del producto que se difunde al medio ambiente, sin embargo los secadores solares son altamente convenientes de utilizar para varios productos locales desde granos , ciertas hortalizas y granos de frutos como uvas y arándanos. De esta forma se evita el uso de secadores a combustión o de otra naturaleza que signifique el uso de combustibles fósiles que emiten gases de efecto invernadero.

1.7 Limitaciones del trabajo

Las limitaciones del trabajo de investigación se dan según el tipo de alcance de investigación, es decir se considera un alcance de investigación aplicada, porque utiliza los conocimientos establecidos en distintas áreas del conocimiento como termodinámica, física y energía solar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 La energía solar

La energía solar es un recurso que se utiliza para secado y otras aplicaciones en la industria, su valor radica en los niveles de energía que se transporta en forma de onda electromagnética desde el sol.

2.1.1 Radiación solar

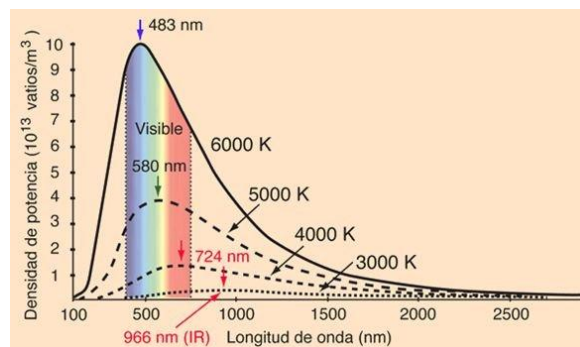
La radiación es la transferencia de energía de un cuerpo en forma de ondas electromagnéticas, que se lleva a cabo como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos (Cengel & Ghajar, 2011).

2.1.2 Radiación térmica

La radiación térmica es energía electromagnética que se propaga a través del espacio a la velocidad de la luz. La temperatura de un cuerpo genera que los átomos y moléculas que lo componen sufran una excitación energética que se emite en forma de radiación electromagnética (Duffie & Beckman, 1991).

Figura 1

Espectro de radiación térmica



Nota: Espectro de radiación térmica, tomado de página <https://educate-fiug.site>

2.1.3 Cuerpo negro

Se atribuye como cuerpo negro a un objeto que absorbe y emite toda la energía un cuerpo teórico definido para medir a los demás cuerpos (Duffie & Beckman, 1991).

$$E = \sigma T^4 \quad (01)$$

2.1.4 Radiación atmosférica

Nide la relación entre la temperara entre la superficie y el cielo, se puede considerar como cuerpo negro a una temperatura que se define como cielo T (Duffie & Beckman, 1991).

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{sup}^4 - T_{cielo}^4) \quad (02)$$

Donde

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, constante de Stefan-Boltzmann.

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (03)$$

2.1.5 Absortividad, reflectividad y transmisividad

Es una propiedad que mide la cantidad de radiación que retiene , es distinto a la emisividad, la absortividad de un material es independiente de la temperatura de la superficie, pero depende de la temperatura de la fuente de radiación (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\alpha = \frac{\text{Radiacion absorbida}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{I_{abs}}{I}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (04)$$

La reflectividad equivale a la cantidad de radiación que un cuerpo refleja respecto a la radiación total incidente.

$$\rho = \frac{\text{Radiacion reflejada}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{I_{ref}}{I}, 0 \leq \rho \leq 1 \quad (05)$$

La fracción de radiación transmitida por una superficie respecto a la radiación total incidente, se llama transmisividad y se representa por la letra griega τ

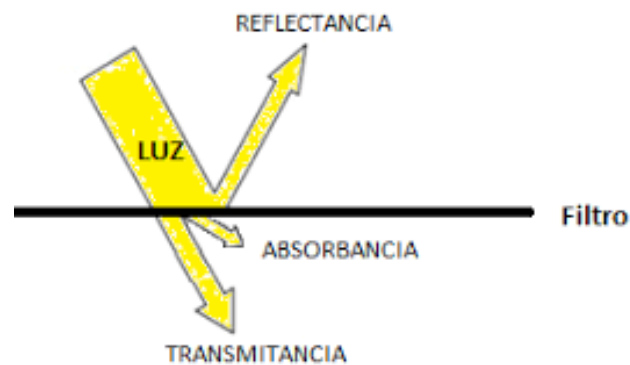
$$\tau = \frac{\text{Radiacion transmitida}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{I_{tr}}{I}, 0 \leq \tau \leq 1 \quad (06)$$

La relación entre estos parámetros equivale a

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (07)$$

Figura 2

Reflectancia, absorbancia y transmitancia de la luz solar



Nota: Imagen tomada de <https://zaguan.unizar.es>

2. 2 Proceso de secado

Proceso térmico centrado en reducir la humedad de un producto utilizando un medio de calefacción.

$$M_{wb} = \frac{m_w}{m_p} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de producto húmedo}} \right] \quad (08)$$

La humedad en base seca relaciona la masa de agua en el producto y la masa del sólido seco.

$$M_{wb} = \frac{m_w}{m_d} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de producto seco}} \right] \quad (09)$$

La masa total del producto (m_p) es igual a la suma de las masas del producto seco (m_d) y el agua presente en el sólido (m_w).

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{1+M_{db}} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de producto húmedo}} \right] \quad (10)$$

$$M_{db} = \frac{M_{wb}}{1+M_{wb}} \left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de producto seco}} \right] \quad (11)$$

2.3 Humedad de equilibrio

Cantidad de humedad de un sólido higroscópico en condiciones de equilibrio con el agente desecante. (Belessiotis & Delyannis, 2010).

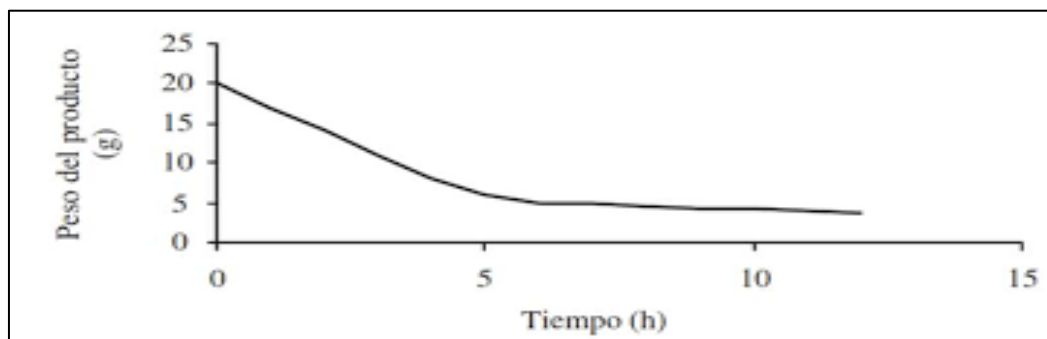
$$M_e = f(RH, T) \quad (12)$$

2.4 Cinética del secado

Mide la cantidad de humedad perdida o evaporada en el tiempo de secado y el consumo de energía (Dávila Nava, 2004)

Figura 3

Curva de velocidad de secado

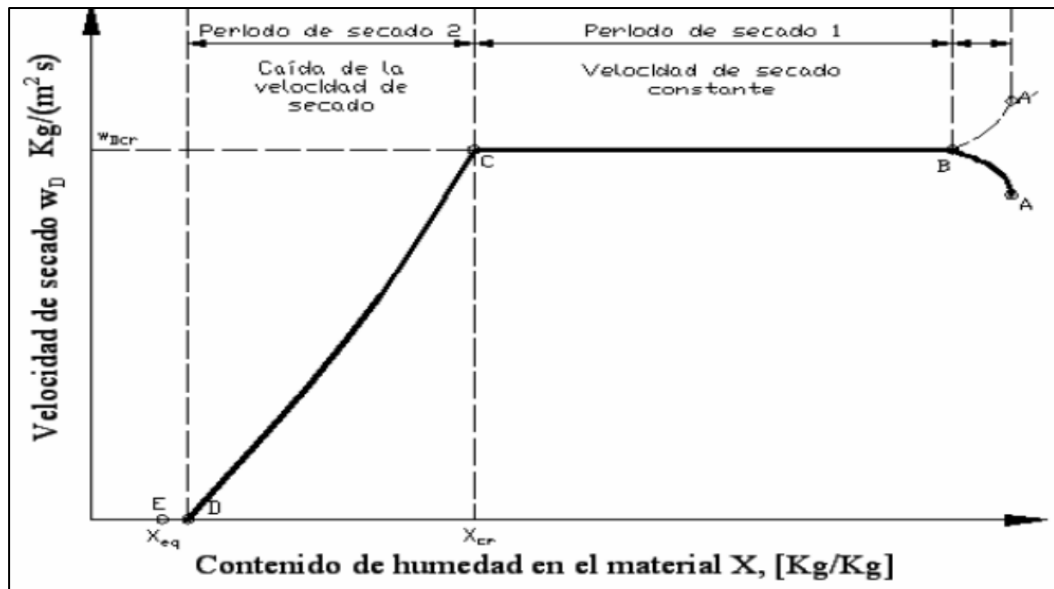


Nota: imagen de curva de secado tomado de libro Duffy, energy solar

La curva de velocidad de secado. Se observa la fase inicial de secado A-B, la fase de de velocidad constante B-C y la fase de caída de velocidad de secado C-D hasta llegar al valor de humedad de equilibrio.

Figura 4

Curva de contenido de humedad en materiales



Nota: imagen de curva de secado tomado de libro Duffy, energy solar

2.5 Aire húmedo o aire atmosférico

Se cumple la ley Dalton, donde la presión total del sistema equivale a la suma de las presiones parciales de sus componentes.

$$P_o = P_{as} + P_v \quad (13)$$

2.6 Presión de saturación del vapor

Relaciona la presión parcial de vapor contenido en una mezcla de aire húmedo que contiene la máxima cantidad de vapor de agua posible a una determinada temperatura. (Cengel & Boles, 2011).

Se puede calcular con la siguiente ecuación (Hayakawa & Succar, 1982)

$$P_{sv} = 0.61078 \exp\left(\frac{17.26933882(T_a - 273.15)}{T_a - 35.85}\right) \text{ kPa} \quad (14)$$

2.6.1 Humedad relativa

Mide la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo respecto a la cantidad de vapor de agua si el aire estuviese saturado.

$$RH = \frac{m_v}{m_{v,sat}} = \frac{\frac{P_v}{R_v}}{\frac{P_{sv}}{R_{sv}}} = \frac{P_v}{P_{sv}} \left[\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg de vapor saturado}} \right] \quad (15)$$

2.6.2 Humedad específica

Se conoce también como la humedad absoluta o relación de humedad, representada como la masa de vapor de agua presente en una unidad de aire seco (Cengel & Boles, 2011).

$$H = \frac{m_v}{m_{as}} \left[\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} \right] \quad (16)$$

$$H = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{\frac{P_v}{R_v}}{\frac{P_{as}}{R_{as}}} = 0.622 \frac{P_v}{P_0 - P_v} \left[\frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} \right] \quad (17)$$

Se establece la relación matemática que existe entre la humedad específica y la humedad relativa de una mezcla bifásica de aire seco y vapor de agua.

$$H = 0.622 \frac{RH * P_{sv}}{P_0 - RH * P_{sv}} \left[\frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg aire seco}} \right] \quad (18)$$

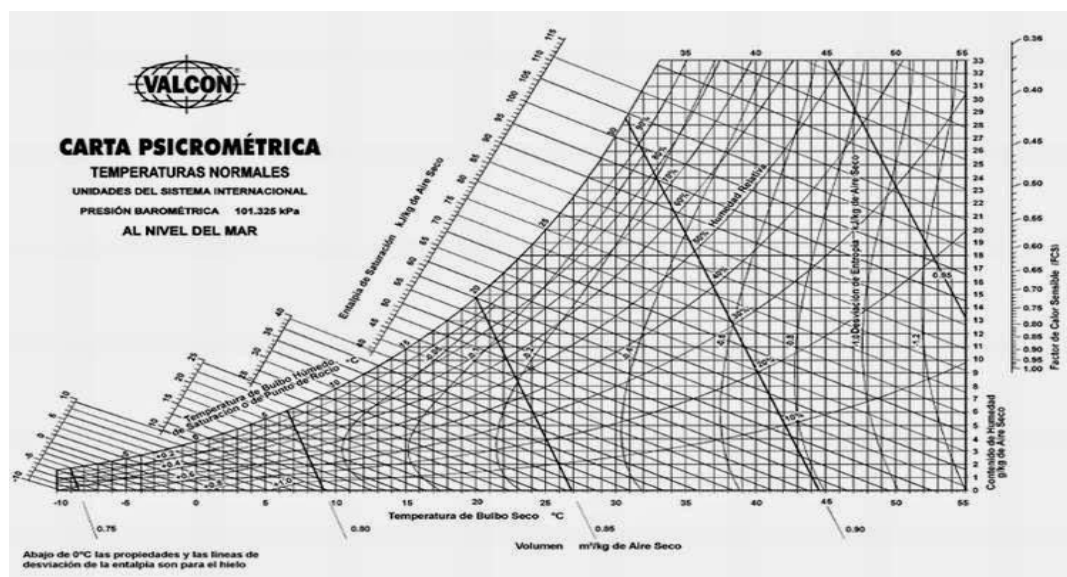
$$RH = \frac{H \cdot P_o}{(H + 0.622) P_{sv}} \left[\frac{\text{kg de vapor}}{\text{kg vapor saturado}} \right] \quad (19)$$

2.6.3 Carta psicrométrica

La carta psicrométrica contiene líneas o curvas trazadas a partir de ecuaciones de estado relacionadas a la mezcla aire seco – vapor de agua.

Figura 5

Carta psicrométrica



Nota: imagen tomada de libro de termodinámica técnica, Moran y Shapiro

2.7 Control y niveles de secado

Consiste en un proceso controlado donde se tiene una masa de un producto cuyas condiciones iniciales presenta una humedad alta y que al utilizar una fuente de energía que provea calor, el material o masa experimenta la transferencia de energía mediante conducción, convección y radiación.

2.8 Productos comunes en el secado

La técnica del secado aparece en los inicios de las civilizaciones humanas con el fin de conservar los alimentos y se exponía al elemento a secar al sol. Actualmente este proceso se realiza mediante técnicas avanzadas usando maquinas que controlan el gradiente térmico y el tiempo de secado y se manejan grandes cantidades de productos a secar (FAO, 2018).

2.9 Clasificación de los secadores solares

Entre las mas utilizadas se encuentran los secadores a convección, que utiliza aire u otro fluido que transporte el calor desde una zona de alta temperatura y hacer contacto con el material de secado durante un tiempo determinado.

2.10. Secador por convección

Es un mecanismo donde se utiliza aire como fluido calefactor a través de una corriente convectiva. (Mujumdar, 1995).

2.10.2 Secador por conducción o por contacto

Los secadores por conducción o de contacto están caracterizados porque la transferencia de calor se realiza por conducción, esto requiere que el producto esté en contacto directo con una superficie a alta temperatura para realizar la transferencia de calor.

2.10.3 Secadores por radiación

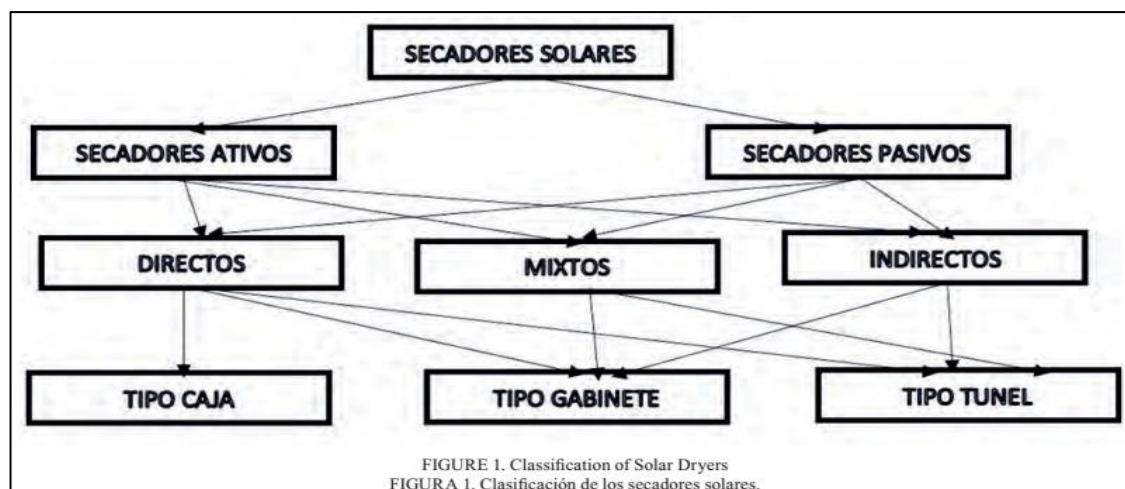
En estos equipos se usan fuentes de radiación electromagnética de longitudes de onda que incluyen el espectro solar y microonda

2.11 Secadores solares según su configuración

Se distinguen en secadores activos y pasivos y dentro de esta clasificación se encuentran una variación de diseño que se adaptan al tipo de materia a secar, así como las condiciones de radiación del medio ambiente (Ekechucwu & Norton, 1997).

Figura 6

Clasificación e secadores solares



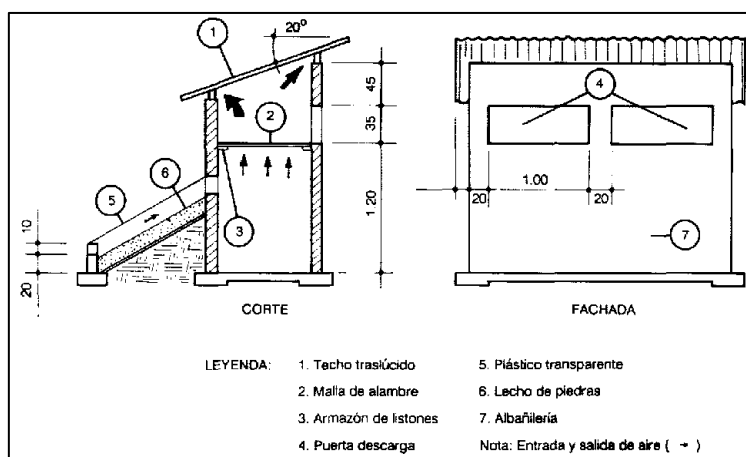
Nota: Organigrama tomado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542018000100009

2.11.1 Secadores solares directos de convección natural

Son unidades pequeñas y su forma general de diseño presenta un modelo de caja o gabinete, utilizados para cantidades pequeña de secado como carnes, vegetales y granos (Ekechucwu & Norton, 1997).

Figura 7

Secador solar de convección natural



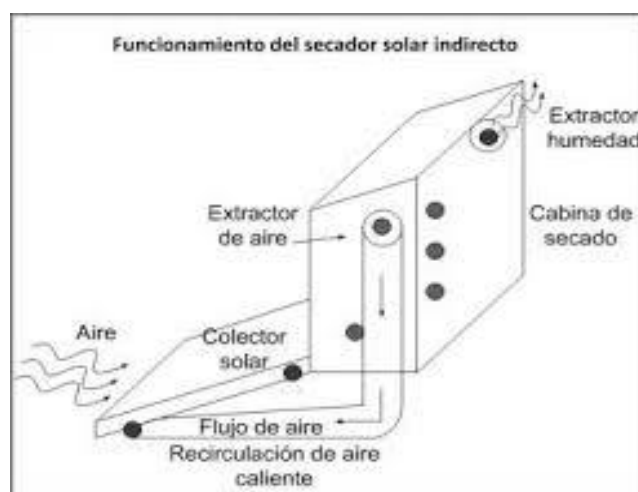
Nota: imagen de secador solar tomado de <https://www.fao.org/3/x5058s/x5058S03.htm>

2.11.2 Secadores solares indirectos de convección natural

Equipos que disponen de bandejas ubicadas dentro de la cámara de secado por donde circula aire caliente que proviene del captador del secador.

Figura 8

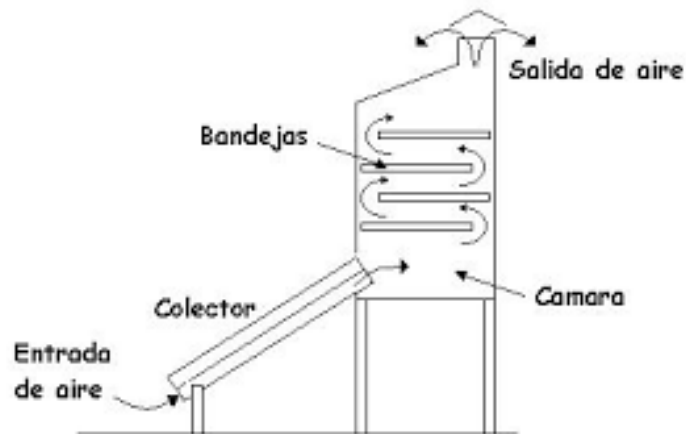
Secador solar indirecto



Nota: Tomado de <https://www.redalyc.org/pdf/813/81315091008.pdf>

Figura 9

Secador solar mixto de convección natural



Nota: imagen de secador solar mixto tomado de <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-t%C3%A9cnico-secador-solar-de-caf%C3%A9.pdf>

2.11.3 Secadores solares de convección forzada o secadores activos

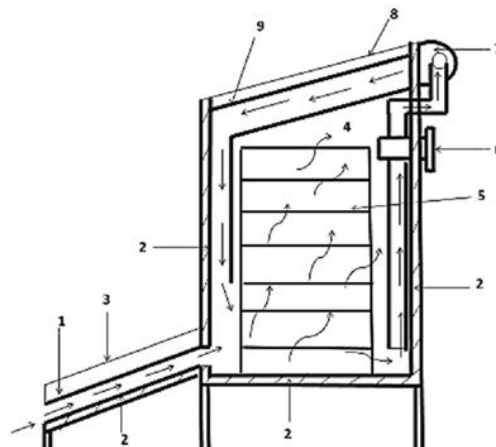
En estos secadores se realiza la circulación del aire se realiza mediante ventiladores. Estos secadores son utilizados para procesar a gran escala productos comerciales. (Ekechucwu & Norton, 1997).

2.11.4 Secadores solares directos de convección forzada

Son equipos que llevan incorporador un sistema de ventilación de aire que hace que el calor sea absorbido y forzado a recircular.

Figura 10

Secador solar directo de convección forzada



Nota: imagen de Secador solar tomado de <https://www.scielo.org.mx>

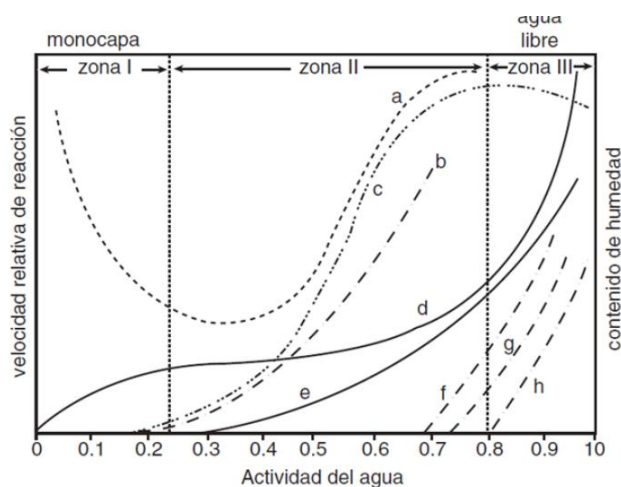
2.11.5 Secado de arándanos

El arándano (*Vaccinium* spp.) presenta aproximadamente un 85% de fracción de masa de agua. Este elevado contenido de humedad lo hace propenso al deterioro por crecimiento microbiano, disminuyendo su calidad postcosecha. La vida útil aproximada de los arándanos cosechados varía entre 7 y 40 días, lo que depende principalmente del genotipo, el método de cosecha y las condiciones de almacenamiento, así como del método de almacenamiento (Pobiega y col., 2021).

La deshidratación o secado de una fruta tiene como objetivo reducir la actividad del agua y, en consecuencia, la actividad microbiana y la velocidad de las reacciones químicas implicadas en los procesos de degradación (Vega-Mercado y col. 2001), con el fin de prolongar la vida útil (Reque y col., 2016).

Figura 11

Gráfica de cambios que ocurren en los alimentos según la humedad



Nota: imagen tomada de <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream>

2.12 Deterioros comunes en secado

Gascón et. al., (2013), dice que el pardeamiento no enzimático o reacción de Maillard es una reacción química en la que se combinan azúcares simples con aminoácidos, derivados de estructuras proteicas degradadas; la reacción genera sustratos de color pardo a negros que deterioran el color significativamente. Esta reacción se promueve por temperatura, pH y desnaturalización proteica. El uso del dióxido de azufre o soluciones de metabisulfito son formas de interferencia química o bloqueo de la reacción.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Materiales

Figura 12

Listones de madera

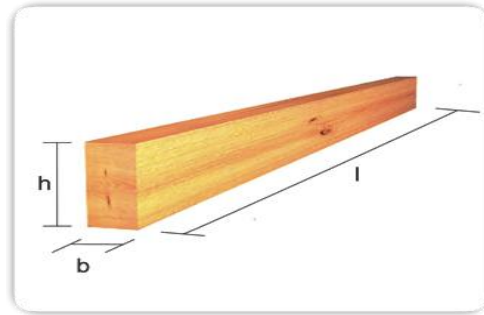


Figura 13

Vidrio simple y doble



Figura 14

Pegamento o cola de carpintero



Figura 15

Bisagras



Figura 16

Medidor de radiación solar



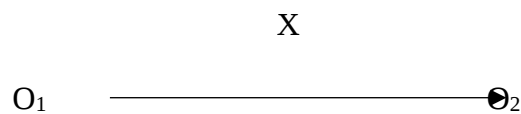
3.2 Métodos

3.2.1 Metodología de investigación

La investigación corresponde al método analítico y por su finalidad aplicada y consiste en una secuencia de procedimiento ordenado de la siguiente manera.

3.2.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación corresponde al tipo experimental disponiéndose la variación de flujo de aire de entrada al sistema para influir en el rendimiento de secado.



O₁: observación inicial: peso inicial

O₂: Calentamiento con aire

X: cambios o manipulación: peso final

Imágenes del proceso de secado

a. Materia prima de secado

Figura 17

Muestra de arándano azul para secado de prueba



Nota: variedad de arándano azul de 1.3 mm de radio aproximadamente

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Diseño de cargas y dimensiones

Considerando una muestra de secado de 2.5 Kg determinara el área de la cámara de secado para arándanos.

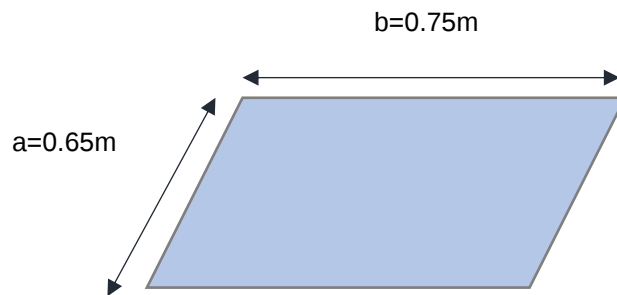
$$A_s = \frac{\text{masa}}{\rho_{\text{arandano}} * d_{\text{es,cama}}}$$

$$A_s = \frac{2.5 \text{ Kg}}{250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.012\text{m}} = 0.5\text{m}^2$$

Calculando el área de las bandejas que se expondrán a secado

Figura 18

Área o superficie de bandeja



Área de la bandeja

$$A_{\text{bandejas}} = (0.65\text{m} * 0.75\text{m}) = 0.48\text{m}^2$$

$$A_{\text{bandejas}} = 0.48\text{m}^2$$

Donde

A_s : área de cámara de secado de granos de arándanos(m^2)

ρ_{arandano} : densidad de los arándanos (250 kg/m^3)

e_{cama} : espesor de la cama de secado de granos de arándano

Esta superficie se distribuirá en la bandeja con el propósito de hacer óptimo el espacio y la relación de calor que absorberá cada bandeja, se asumirá un área de bandeja de 0.65mx0.75m, obteniendo un área efectiva de:

$$N_{bandeja} = \frac{A_s}{A_b} = \frac{0.5m^2}{0.48m^2} = 1.041$$

$$N_{bandeja} = 1 \text{ bandeja}$$

Donde

N_b : Número de bandejas

A_b : Área de una bandeja (m^2)

4.2 Cantidad de agua a deshidratar

Para el inicio de proceso se tiene 2.5 Kg de arándanos con una humedad inicial de 92%, cuya humedad final debe de caer hasta 30%.

Calculando la cantidad de agua contenida en los arándanos

$$M_{agua, inicial} = X_i * M_{Sec}$$

X_i : humedad inicial del arándano

M_{Sec} : masa de arándanos para secado (kg)

$$M_{agua, inicial} = 0.92 * 2.5kg = 2.3 \text{ kg}$$

Calculo de masa seca de arándanos

$$M_{seca} = M_{Sec} - M_{agua\ inicial}$$

$$M_{seca} = 2.5 \text{ kg} - 2.3 \text{ kg} = 0.2 \text{ kg}$$

Encontramos la cantidad de humedad al final requerida hasta 30 %

$$masa_{final} = \frac{X_f * masa\ seca}{1 - X_f}$$

$$masa_{final} = \frac{0.30 * 2.5kg}{1 - 0.30} = 1.071 \text{ kg}$$

Luego la masa de agua a evaporarse en los arándanos será.

$$masa_{\text{agua evaporar}} = masa_{\text{agua inicial}} - masa_{\text{final}}$$

$$masa_{\text{agua evaporar}} = 2.3 \text{ kg} - 1.071 \text{ kg}$$

$$masa_{\text{agua evaporar}} = 1.23 \text{ kg}$$

4.3 Balance de calor en secador

Se usa el balance de energía de la primera ley de la termodinámica para relacionar a la humedad que se pierde por efecto del calor producido por el secador, en el proceso se considera la masa del arándano y las variables físicas del aire y sus propiedades utilizadas en transferencia de calor.

$$Q_s = \dot{m} * c_p * (T_s - T_a)$$

$$Q_s = 1.23 \text{ kg} * 3.762 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * (42.3 - 24)^\circ\text{C} = 84.678 \text{ kJ}$$

4.4 Cálculo del calor latente de vaporización del agua

Donde:

X: Es la humedad inicial

T: es la temperatura en la cabina de secado

Reemplazando se tiene

$$H_{fg} = (250.4 - 2.42958 * T)(1 + 1.44408 \exp(-21.5011 * X))$$

$$H_{fg} = (250.4 - 2.42958 * (42.3))(1 + 1.44408 \exp(-21.5011 * (0.92)))$$

$$H_{fg} = 147.628 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

Cálculo del calor latente

$$Q_L = \text{masa}_{\text{agua evaporar}} * H_{fg}$$

$$Q_L = 1.23 \text{ kg} * 147.628 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_L = 181.582 \text{ kJ}$$

Luego el calor producido por el calor sensible y latente queda expresado de la siguiente forma

$$Q_{\text{producto}} = Q_s + Q_L$$

$$Q_{\text{producto}} = 84.678 \text{ kJ} + 181.582 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{producto}} = 266.26 \text{ kJ}$$

4.5 Coeficiente de convección externo

Considerando una velocidad media de 2.5 m/s de viento local en la zona externa al equipo de secado.

$$h_e = 5,7 + 3.8 * V_{\text{viento}}$$

$$h_e = 5,7 + 3.8 * 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 15.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

h_e : coeficiente de convección externa ($W/m^2\text{°C}$)

Parámetros de la cámara de secado

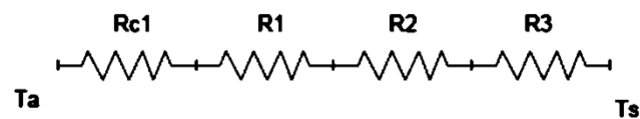
- Longitud : 0.75
- Ancho : 0.80
- Altura : 1.75 m
- Longitud de radio de acumulador térmico : 0.6 m
- Altura de absorbedor térmico : 0.05m
- Espesor de capa de aislamiento térmico : 0.03m

4.6 Pérdidas de calor en secador

Pérdidas de calor producidas por transferencia de calor por conducción, convección y radiación se calculan mediante un esquema de resistencias térmicas.

Figura 19

Circuito de resistencias térmicas de conducción del calor



Nota: Configuración de resistencias conductivas en secador

$$R_1 = \frac{E_{mad}}{k_{mad} \cdot A_{ext}} = \frac{0.03m}{(0.04)(1.13m^2)} = 0.66\text{°C/W}$$

$$R_2 = \frac{E_{aislante}}{k_{aisl} \cdot A_{ext}} = \frac{0.05m}{(0.04 \frac{W}{m\text{°C}})(1.13m^2)} = 0.88\text{°C/W}$$

Donde

R_1 y R_2 son las resistencias a la conducción de calor de la madera y del aislante térmico

E_{mad} y E_{aisl} Espesor de la madera y del aislamiento térmico

k_{mad} y k_{aisl} Conductividad térmica de la madera ($0.04 W/m^2\text{°C}$)

A_{ext} : Área exterior de una de las caras de la cámara de secado ($1.75m \times 0.65m$)

Se utilizó madera para la cubierta externa del secador con la finalidad de reducir costos de diseño además de utilizar materiales ecológicos.

$$R_3 = \frac{L_{\text{Adoquines}}}{k_{\text{adoquines}} * A_{\text{ext}}} = \frac{0.60 \text{ m}}{(0.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}})(1.13\text{m}^2)} = 0.792 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

R_3 : resistencia a la conducción del lecho de adoquines del absorbedor circular($^\circ\text{C/W}$)

$k_{\text{adoquines}}$: Conductividad térmica de los adoquines ($0.67 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

L_{Adoquin} : longitud radial de acumulador de adoquines

4.7 Resistencia externa de calor por convección

$$R_{\text{Conv},1} = \frac{1}{h_e * A_{\text{ext}}}$$

$$R_{\text{Conv},1} = \frac{1}{15.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}} * 1.13\text{m}^2} = 0.0582^\circ\text{C/W}$$

Realizando la suma de todos los coeficientes convectivos

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{conv},1} = 0.931 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{Total}} = 0.66^\circ \frac{\text{C}}{\text{W}} + 0.88^\circ \frac{\text{C}}{\text{W}} + 0.792^\circ \frac{\text{C}}{\text{W}} + 0.0582^\circ \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{Total}} = 2.3902 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

4.8 Calor perdido por resistencia de conducción

Se observa que la bandeja requiere de energía térmica para calentarse e incrementar su temperatura, estas bandejas son elaboradas de mallas metálicas cuyas características se indican a continuación.

Densidad del aluminio: $\rho_{Al} = 2800 \frac{kg}{m^3}$

Calor específico del aluminio: $C_p = 0.875 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$

Masa de la bandeja tipo malla metálica: 0.250 kg

Al ser la bandeja de malla metálica se puede distribuir de manera uniforme el calor en toda la superficie.

Cálculo del calor que se pierde por las resistencias conductivas

$$Q_p = \frac{T_{interior} - T_a}{R_t} = \frac{(42.3 - 24)^{\circ}C}{2.3902^{\circ}C/W} = 7.6562 W$$

Luego estimamos el calor que se pierde por efecto de las resistencias conductivas antes calculadas

$$Q_p = \frac{7.6562 W * 3600}{1000} = 27.56 kJ$$

4.9 Calor requerido para calentar la bandeja

Calculando el calor

$$Q_s = \dot{m} * c_p * (T_s - T_a)$$

$$Q_s = 0.250 kg * 0.875 \frac{kJ}{kgK} * (42.3 - 24)^{\circ}C = 4.0031 kJ$$

Sumando todos los calores necesarios para la cámara de secado se obtiene

$$Q_{\text{Total}} = Q_P + Q_{\text{Prod}} + Q_I$$

$$Q_{\text{Total}} = 27.56 \text{ kJ} + 4.0031 \text{ kJ} + 266.26 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{Total}} = 297.823 \text{ kJ}$$

La cantidad de energía requerida para el proceso de secado es de 297.823 kJ para secar una masa de 2.5 kg de arándanos azules.

4.10 Irradiación solar

Tomando la base de datos de irradiación solar para los meses de enero hasta noviembre de 2023

Los datos de referencia mostrados por Acero, Roncal, el valor más bajo de irradiación solar se registró en el mes de junio con un valor de $I = 725, 23 \text{ w/m}^2$, y considerando 9 horas diarias de actividad de secado en campo, se tiene:

Irradiancia promedio mensual

$$I = 725,23 \frac{W}{m^2} * 9h = 6527.07 \frac{Wh}{m^2}$$

Este valor se contrastará en la gráfica mediante la página de <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/chimbote.html>, registrando un valor promedio de $6994 \frac{Wh}{m^2}$

Tomando el promedio de ambos valores se tiene

$$I = \frac{6527.07 \frac{Wh}{m^2} + 6994 \frac{Wh}{m^2}}{2} = 6760.535 \frac{Wh}{m^2}$$

$$I = 6760.535 \frac{Wh}{m^2}$$

4.11 Potencia térmica del secador

$$P_{\text{secador}} = Q_{\text{aire}} * \rho_{\text{aire}} * C_{p_{\text{aire}}} * (42.3 - 24)^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{aire}} = V_{\text{aire}} * A_{\text{captador}}$$

$$Q_{\text{aire}} = 0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \pi(0.80\text{m} * 1.75\text{m}) = 0.14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Densidad del aire a 24°C: $\rho_{\text{aire}} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Calor específico del aire al ingreso a la cabina $C_{p_{\text{aire}}} = 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}}$

$$P_{\text{secador}} = 0.14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{K}} * (42.3 - 24)^{\circ}\text{C} = 3054.64\text{W}$$

Calculando la energía requerida incidente sobre el colector para calentamiento del aire de ingreso

$$E_{\text{secador}} = P_{\text{secador real}} * 3600 * 7h$$

$$E_{\text{secador}} = 3054.64\text{W} * 3600 * 7h$$

$$E_{\text{secador}} = 76.97\text{MJ}$$

4.12 Área efectiva del captador solar

Del dato se tiene que la irradiancia promedio es de $I = 6760.535 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$

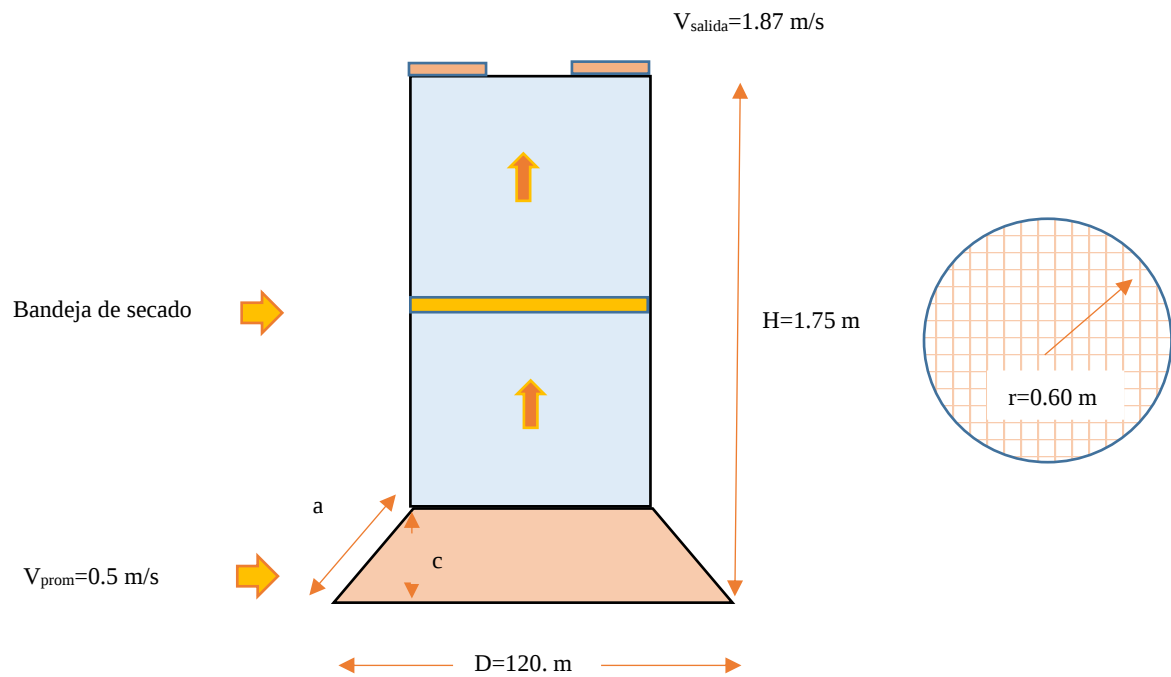
$$I = 6760.535 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * 3600 = 24,33\text{MJ}$$

$$A_{\text{Effect.Secador}} = \frac{E_{\text{secador}}}{I}$$

$$A_{\text{Effect.Secador}} = \frac{76.97\text{MJ}}{24,33\text{MJ}}$$

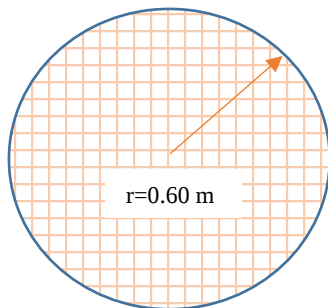
$$A_{\text{Effect.Secador}} = 3.16\text{m}^2$$

Cálculo de área total

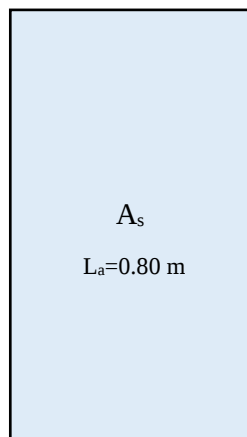


Área del absorbedor solar

Se considera un absorbedor solar radial o circular sobre la cual incide la radiación solar, se estimará un radio de $r=0.6\text{m}$



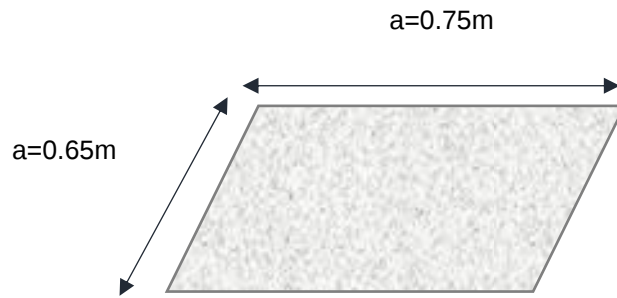
$$A_{absorbedor} = \pi r^2 = \pi (0.6\text{m})^2 = 1.130 \text{ m}^2$$



Área del cuerpo de la cabina

$$A_{cabina} = 0.80\text{m} * 1.65\text{m} = 1.4\text{m}^2$$

Área de la bandeja de malla metálica



Área de la bandeja

$$A_{bandejas} = (0.65m * 0.75m) = 0.48m^2$$

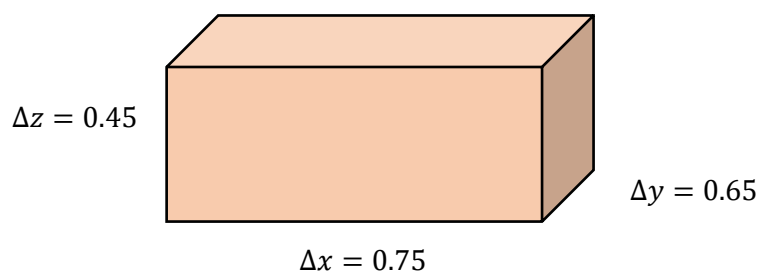
$$A_{bandejas} = 0.48m^2$$

$$A_{total} = A_{absorbedor} + A_{cabina} + A_{bandejas}$$

$$A_{total} = 1.130 m^2 + 1.4m^2 + 0.48m^2 = 3.01 m^2$$

Cálculo del área de volumen de control para secado

$$A = \Delta x \cdot \Delta y + 2(\Delta x \cdot \Delta y + \Delta z \cdot \Delta y)$$



Reemplazando se tiene

$$A = \Delta x \cdot \Delta y + 2(\Delta x \cdot \Delta y + \Delta z \cdot \Delta y)$$

$$A = 0.75 * 0.45 + 2(0.75 * 0.65 + 0.45 * 0.65)$$

$$A = 1.8975 m^2$$

4.13 Curvas del proceso de secado

En la parte experimental se ha dispuesto secar 2.5 kg de arándanos de tamaños similares por grano para un proceso de secado de 9 am a 4pm, se han considerado 5 muestras secadas en 5 días continuos de forma independiente a fin de obtener un valor promedio de reducción de humedad y comparar su eficiencia.

Registro de mediciones de primera muestra

Tabla 1

Variación de peso de la primera muestra

muestra 1	
Tiempo (Hora)	Masa solida (gramos)
9	2500
10	2462
11	2310
12	2245.3
13	2148.9
14	1983.2
15	1840.4
16	1764.9

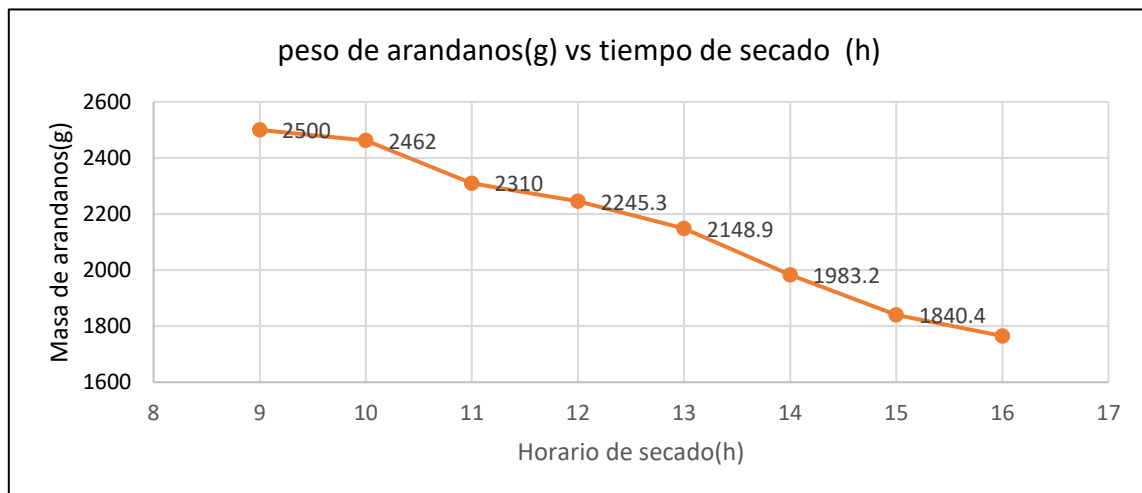


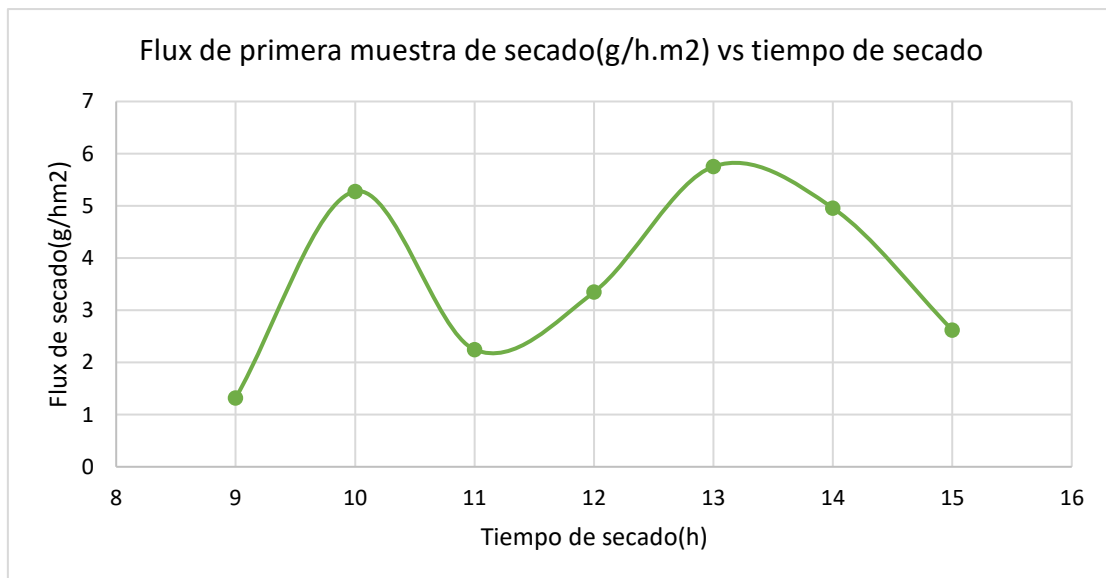
Gráfico 1. Curva de secado de muestra 1

Tabla 2

Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 1

Muestra	Hora	Peso inicial	Peso final	Área secada(bandeja)	tiempo(min)	Flux de secado(g/h.m2)
1	9	2500	2462	0.48	60	1.32
	10	2462	2310	0.48	60	5.28
	11	2310	2245.3	0.48	60	2.25
	12	2245.3	2148.9	0.48	60	3.35
	13	2148.9	1983.2	0.48	60	5.75
	14	1983.2	1840.4	0.48	60	4.96
	15	1840.4	1764.9	0.48	60	2.62

Flux de secado para primera muestra de secado



Gráfica 2. Flux de secado(g/hm²) y tiempo (h) para muestra 2

$$\eta = \frac{\text{agua evaporada(kg)}}{\text{area efectiva de secador} * \text{dias de secado}}$$

$$\eta = \frac{0.7351(kg)}{3.16m^2 * 0.3} = 77.5 \%$$

La humedad final sería H

$$H = \frac{2500g - 1764.9g}{2500g} * 100 = 29.4\%$$

Registro de mediciones de segunda muestra

Tabla 3

Variación de peso de la segunda muestra

muestra 2	
Tiempo (Hora)	Masa solida (gramos)
9	2500
10	2423.4
11	2401.6
12	2356.1
13	2263.4
14	2176.2
15	1987.2
16	1865.3

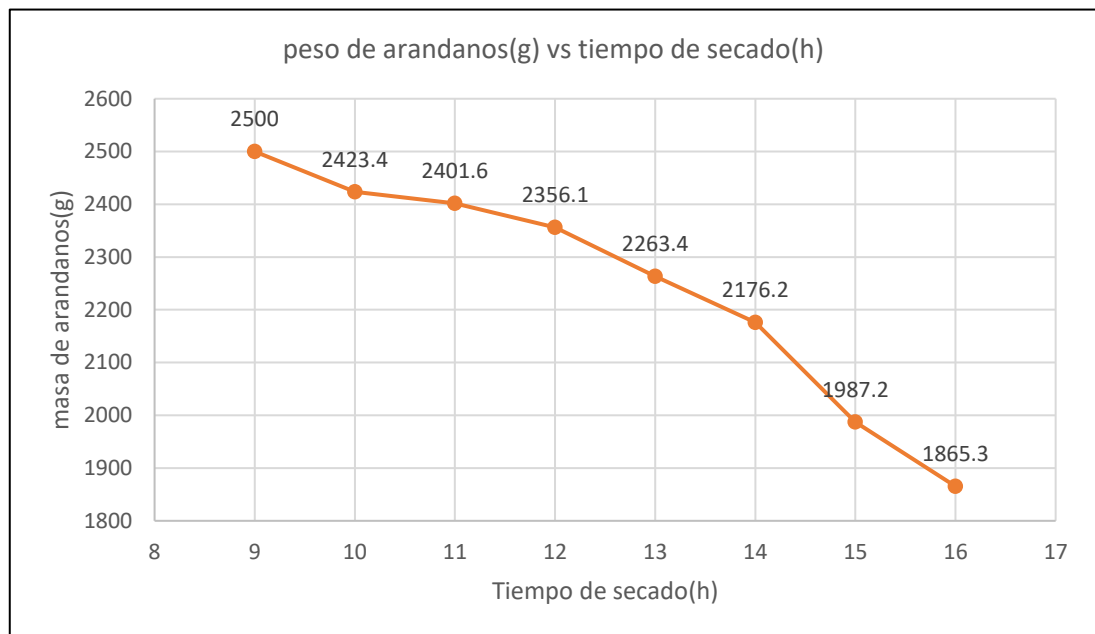
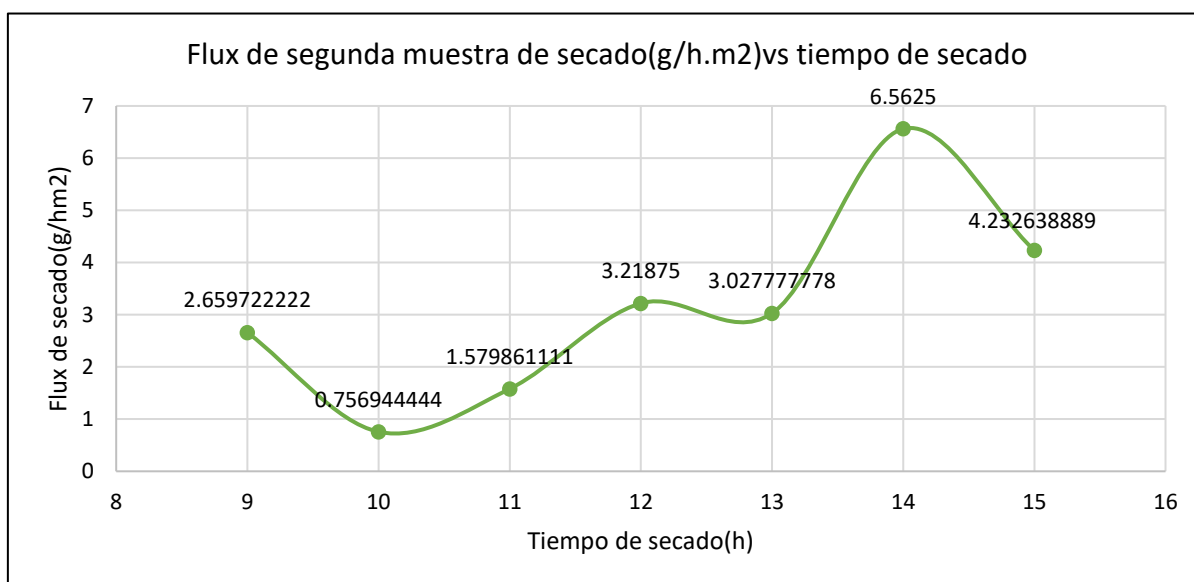


Gráfico 3. Curva de secado de muestra 2

Tabla 4

Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 2

Muestra	Hora	Peso inicial	Peso final	Área secado(bandeja)	tiempo(min)	Flux de secado(g/h.m2)
2	9	2500	2423.4	0.48	60	2.66
	10	2423.4	2401.6	0.48	60	0.76
	11	2401.6	2356.1	0.48	60	1.58
	12	2356.1	2263.4	0.48	60	3.22
	13	2263.4	2176.2	0.48	60	3.03
	14	2176.2	1987.2	0.48	60	6.56
	15	1987.2	1865.3	0.48	60	4.23



Gráfica 4. Flux de secado(g/hm^2) y tiempo (h) para muestra 3

Descripción: El flux de secado inicia con un valor de 2.65 g/hm^2 , y desciende a 0.756 g/hm^2 , al inicio de calentamiento desde 9am a 10 am luego el ratio sube desde las 10am hasta el mediodía 12m este proceso se da debido a que el arándano ha logrado uniformizar su temperatura interna y los la tasa de evaporación se estabiliza aumentando a medida que la radiación solar se incrementa, luego de observa un ligero descenso so entre las 12m y 13 horas y se da un mayor incremento hasta 656 g/hm^2 , este incremento se debe a la menor presencia de viento y la posición del sol casi perpendicular al secador , luego su ratio desciende hasta 4.23 g/hm^2 .

$$\eta = \frac{\text{agua evaporada}(kg)}{\text{area efectiva de secador} * \text{dias de secado}}$$

$$\eta = \frac{0.635(kg)}{3.16m^2 * 0.3} = 66.9\%$$

La humedad final sería H

$$H = \frac{2500g - 1865.3g}{2500g} * 100 = 25.3\%$$

Registro de mediciones de tercera muestra

Tabla 5

Variación de peso de la tercera muestra

muestra 3	
Tiempo (Hora)	Masa solida (gramos)
9	2500
10	2368.1
11	2310.6
12	2241.8
13	2100
14	1965.8
15	1852.3
16	1751.6

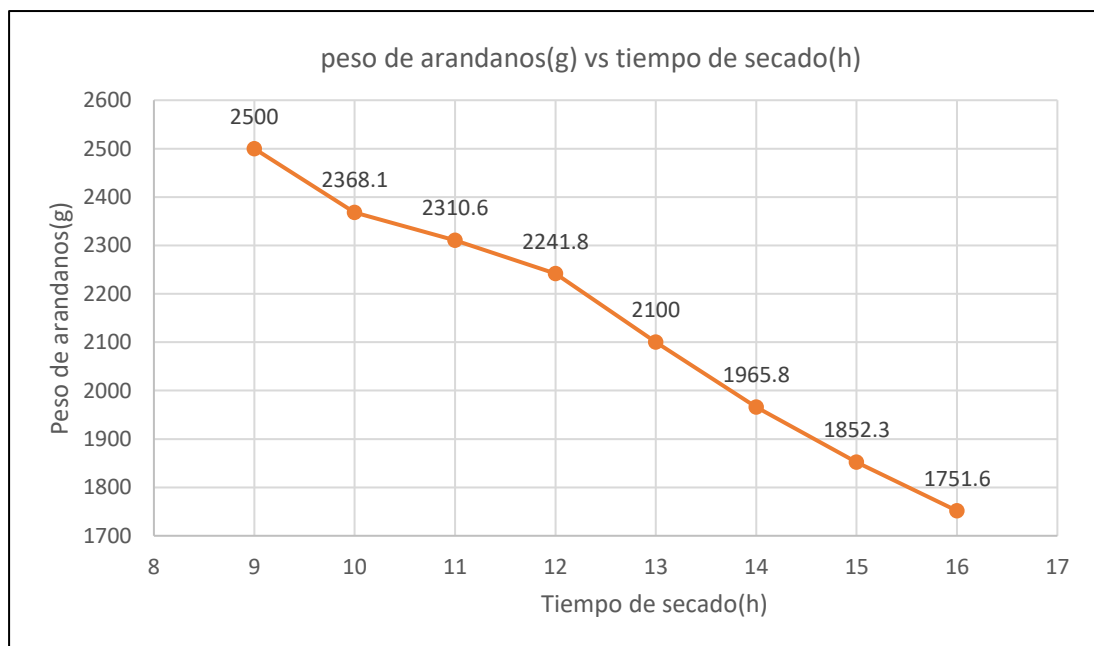
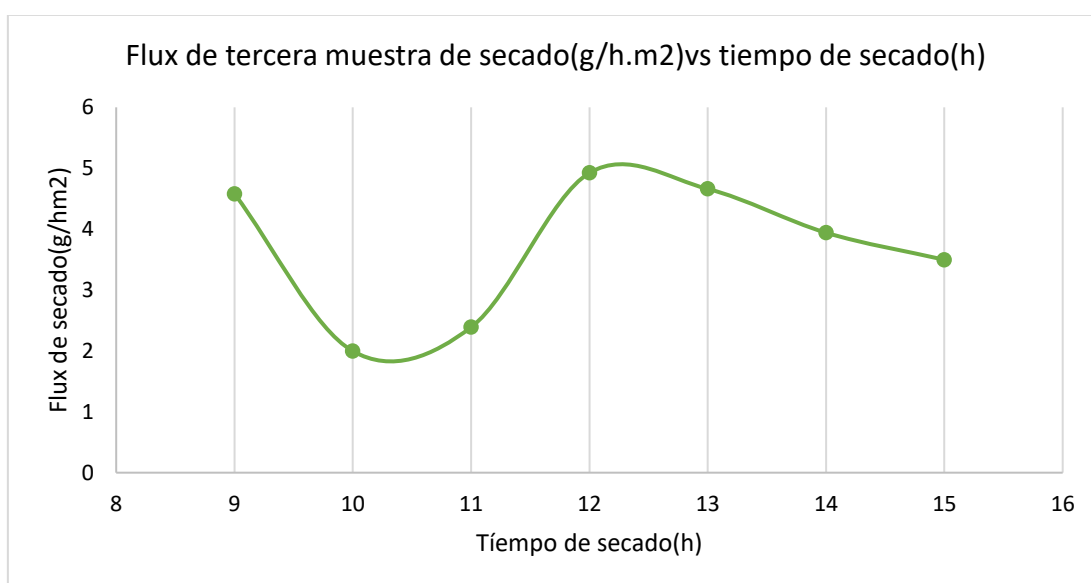


Gráfico 5. Curva de secado de muestra 3

Tabla 6

Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 3

Muestra	Hora	Peso inicial	Peso final	Área secado(bandeja)	tiempo(min)	Flux de secado(g/h.m2)
3	9	2500	2368.1	0.48	60	4.58
	10	2368.1	2310.6	0.48	60	2.00
	11	2310.6	2241.8	0.48	60	2.39
	12	2241.8	2100	0.48	60	4.92
	13	2100	1965.8	0.48	60	4.66
	14	1965.8	1852.3	0.48	60	3.94
	15	1852.3	1751.6	0.48	60	3.50



Gráfica 6. Flux de secado y tiempo(h) de muestra 3

Descripción: El flux de secado inicia con un valor de 4.57 g/hm², y desciende a 1.9 g/hm², al inicio de calentamiento desde 10 am a 11 am alcanzando su primer pico en 2.38 g/hm², y luego un pico máximo a las 12 del mediodía con un valor de 4.92 g/hm² para luego disminuir hasta 3.49 g/hm²

Eficiencia de secado para muestra 3

$$\eta = \frac{\text{agua evaporada}(kg)}{\text{area efectiva de secador} * \text{dias de secado}}$$

$$\eta = \frac{0.749(kg)}{3.16m^2 * 0.3} = 79\%$$

La humedad final sería H

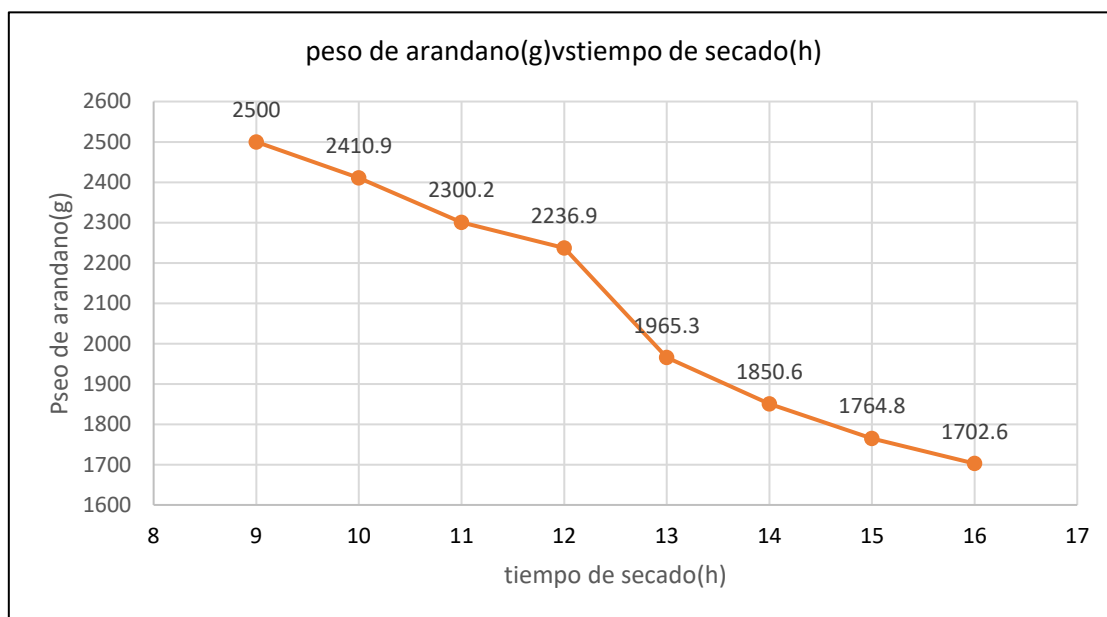
$$H = \frac{2500 \text{ g} - 1751.6 \text{ g}}{2500 \text{ g}} * 100 = 29.9\%$$

Registro de mediciones de cuarta muestra

Tabla 7

Variación de peso de la cuarta muestra

muestra 4	
Tiempo (Hora)	Masa solida (gramos)
9	2500
10	2410.9
11	2300.2
12	2236.9
13	1965.3
14	1850.6
15	1764.8
16	1702.6



Gráfica 7. Curva de secado de muestra 4

Tabla 8

Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 4

Muestra	Hora	Peso inicial	Peso final	Área secado(bandeja)	tiempo(min)	Flux de secado(g/h.m2)
4	9	2500	2410.9	0.48	60	3.09
	10	2410.9	2300.2	0.48	60	3.84
	11	2300.2	2236.9	0.48	60	2.20
	12	2236.9	1965.3	0.48	60	9.43
	13	1965.3	1850.6	0.48	60	3.98
	14	1850.6	1764.8	0.48	60	2.98
	15	1764.8	1702.6	0.48	60	2.16

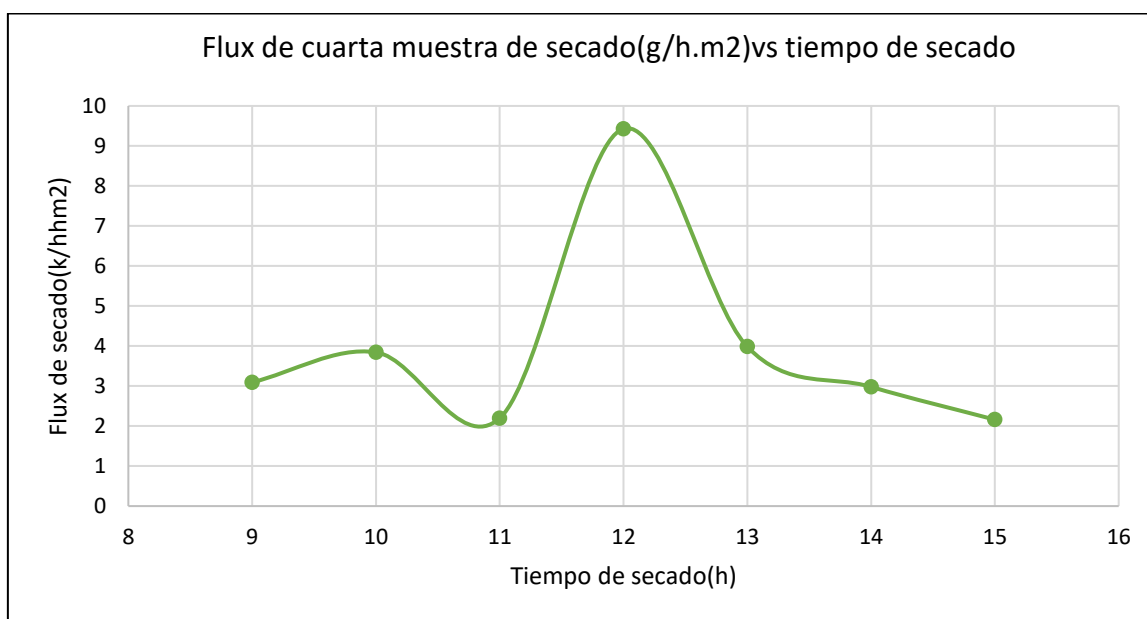


Gráfico 8. Flux de secado vs tiempo(h) de muestra 4

Descripción: El flux de secado inicia con un valor de 3.09 g/hm², y desciende a 2.15g/hm², al inicio de calentamiento desde 9am a 10 am alcanzando su primer pico en 2.19 g/hm², y luego un pico máximo a las 12 del mediodía con un valor de 9.43 g/hm² para luego disminuir hasta 2.15 g/hm²

$$\eta = \frac{\text{agua evaporada}(kg)}{\text{area efectiva de secador} * \text{dias de secado}}$$

$$\eta = \frac{0.7974(kg)}{3.16m^2 * 0.3} = 84.1\%$$

La humedad final sería H

$$H = \frac{2500g - 1702.6g}{2500g} * 100 = 31.8\%$$

Registro de mediciones de quinta muestra

Tabla 9

Variación de peso de la quinta muestra

muestra 5	
Tiempo (Hora)	Masa solida (gramos)
9	2500
10	2423.1
11	2357.7
12	2236.4
13	1964.7
14	1865.2
15	1764.1
16	1723

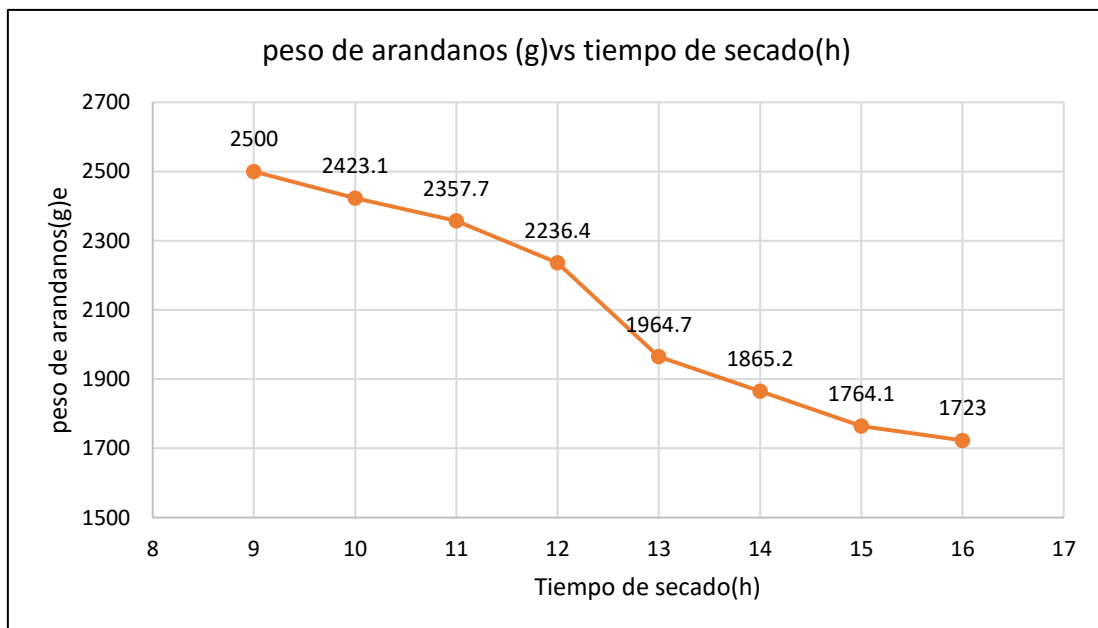


Gráfico 9. Curva de secado de muestra 5

Tabla 10

Datos de mediciones de peso y cálculo de flux de secado de muestra 5

Muestra	Hora	Peso inicial	Peso final	Área secado(bandeja)	tiempo(min)	Flux de secado(g/h.m2)
5	9	2500	2423.1	0.48	60	2.67
	10	2423.1	2357.7	0.48	60	2.27
	11	2357.7	2236.4	0.48	60	4.21
	12	2236.4	1964.7	0.48	60	9.43
	13	1964.7	1865.2	0.48	60	3.45
	14	1865.2	1764.1	0.48	60	3.51
	15	1764.1	1723	0.48	60	1.43

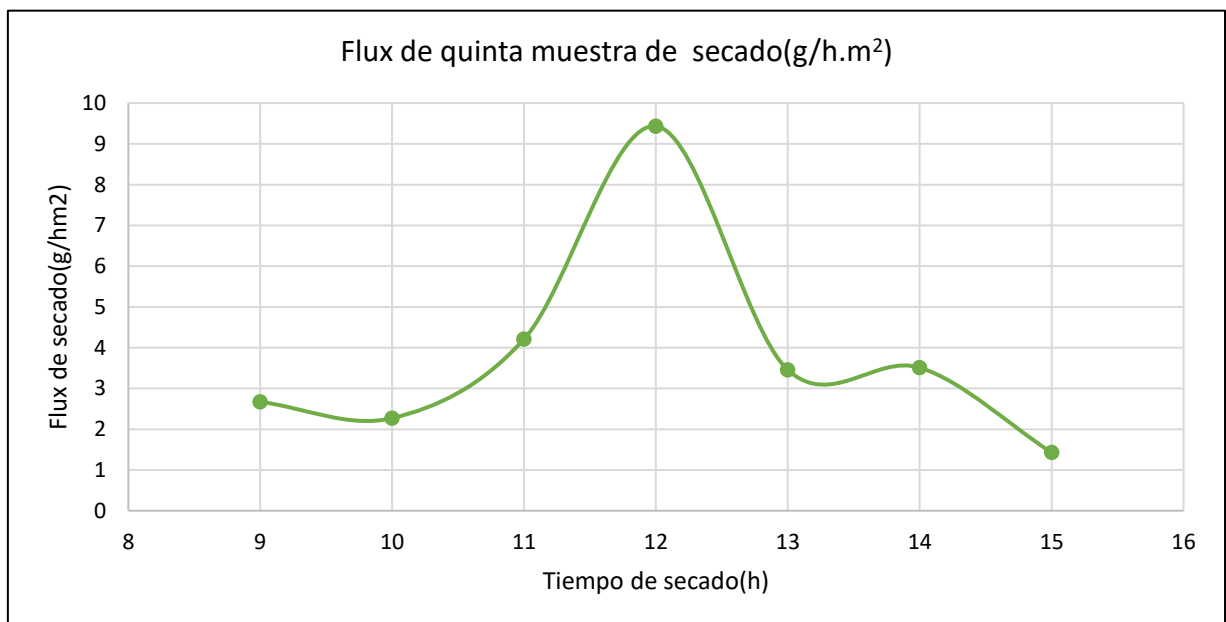


Gráfico 10. Flux de secado de muestra 5

Descripción: El flux de secado inicia con un valor de 2.67 g/hm², y desciende a 1.42 g/hm², al inicio de calentamiento desde 10 am a 11am y luego un pico máximo a las 12 del mediodía con un valor de 9.43 g/hm² para luego disminuir hasta 1.42 g/hm²

$$\eta = \frac{\text{agua evaporada(kg)}}{\text{area efectiva de secador} * \text{dias de secado}}$$

$$\eta = \frac{0.635(kg)}{3.16m^2 * 0.3} = 81.9\%$$

La humedad final sería H

$$H = \frac{2500g - 1723g}{2500g} * 100 = 31.0\%$$

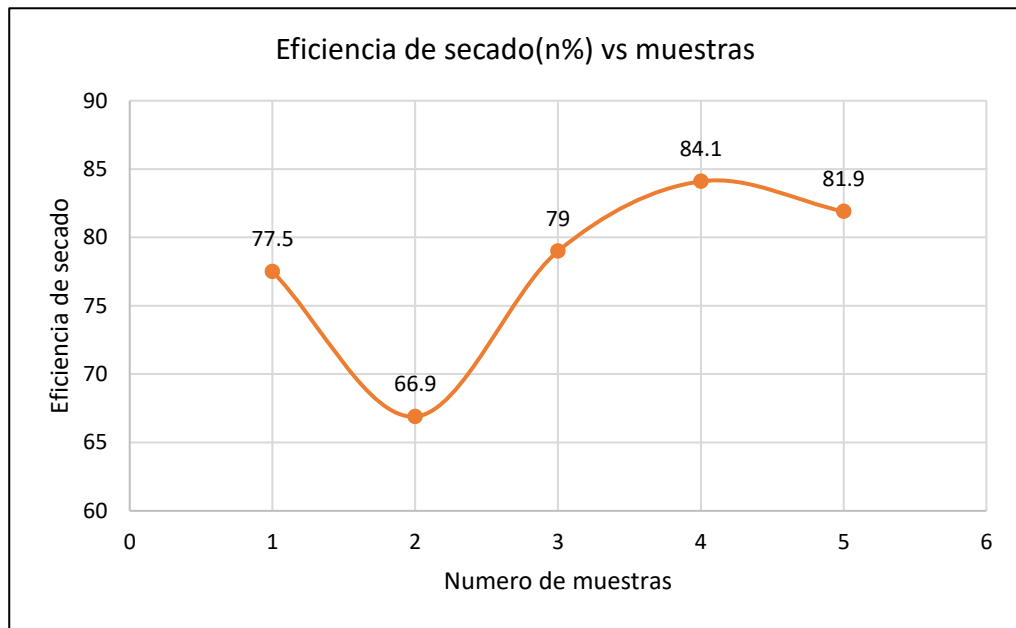


Gráfico 11. Eficiencias de secado por muestra experimental

Descripción: Se observa que la eficiencia de secado es variable en función a los niveles de radiación diario y los efectos ambientales, el valor más favorable es de 84.1%, este valor es alto debido a la cantidad de arándano usado como muestra de secado al ser 2.5 kg el calor se distribuye mejor y se obtiene un tiempo de secado menor y más efectivo.

5. Discusiones

Referido a los resultados

- Respecto a la figura 01, de la pag.48, de la primera curva de secado se tiene una pérdida de masa desde 2500 g hasta 1704.9, representando un 70.59%. Asimismo para la primera muestra de secado de arándanos se puede observar que los ratios de flux más favorables se dan a partir de las 9am hasta las 10am por el nivel de radiación inicial, luego el tramo de tiempo aprovechable con ratios altos se observa a partir de las 11am hasta las 13 horas , en este tiempo el secado presenta una moderada continuidad deduciéndose que el secado no es uniforme y se debe a factores externos como convección , interna en la cabina , convección externa a la cabina.
- Respecto a la figura 2, de la segunda muestra de secado página 50, se tiene una pérdida de masa desde 2500 g hasta 1751.6 representando un 73.6%. Luego para la segunda muestra de secado de arándanos se puede observar que las ratios de flux más favorables se dan a partir de las 10am a 12 del mediodía y de las 13 horas a 14 horas con valores de 0.75 6.56 g/hm² a 6.56 g/hm² y de 3.02 hasta 6.56 g/hm².
- Respecto a la figura 03, de la primera curva de secado de la muestra 3 se tienen una pérdida de 748.4 g el flux de secado aumenta desde las 10am y alcanza su valor máximo a las 12m en 4.9 g/hm² obteniendo una eficiencia de secado de 74%
- Para la muestra 4 se tiene una pérdida de peso es 797.4 g y su flux de secado inicia desde 9am con un valor inicial de 3.093 g/hm² a 10am y alcanza un valor máximo de 9.43 ghm² al medio día y luego el flux desciende hasta 2.159 g/hm², la eficiencia de secado es de 84.1%
- En el proceso de secado de la muestra 5, se tiene una pérdida de peso de 777 g y un flux de secado de inicio de 2.27 g/hm² iniciando a las 10am de forma creciente y alcanza su máximo a las 12 m con un valor de 9.43g/hm², la eficiencia de secado es de 81.9 %

Respecto a las referencias bibliográficas

- Según Solari, R (2018), en su tesis titulada” Uso de deshidratador solar para mejorar la productividad en la elaboración de mango deshidratado en el AA.HH. Manuel Dulanto, 2018 concluye que de la investigación indican que la eficiencia de productividad mejoro en 12.5%, y el proceso de deshidratado mejoró en un 12.75%, además concluye que el equipo tiene una vida media para uso de 18 meses y en cuanto a la calidad del deshidratado se mejoró en 6.7%, para el caso presente la eficiencia de secado para 2.5 kg de arándanos se encuentra entre 77.5 y 81.9% un valor alto a considerarse frente a lo obtenido por Solari, este resultado obtenido se debe a que la relación de área de captación solar en su absorbedor en forma circular y la cabina presenta mayor densidad de área de secado por unidad de masa , además la muestra usada es una cantidad experimental, de la cual si se incrementa la masa de arándanos los ratios del flux de secado se reduciría.
- Según Landa, L. (2019), en su tesis titulada” Diseño, construcción y evaluación de un secador indirecto para comunidades rurales de Tarma”, en su secador de especies herbarias obtuvo los siguientes resultados .Los resultados obtenidos indican que las dimensiones del secador corresponde afondo 0.50 m , ancho 0.50m y 0.50 m de altura , luego el análisis fisicoquímico proximal determino su humedad final entre 12 a 13%, sin embargo la humedad final de las cinco muestras analizadas en las muestra se obtuvo una humedad final de 29.4%, 25.3% , 29.9% , 31.8% y 31.%, respectivamente.
- Mamani, J. (2015), en su tesis titulada” Determinación comparativa de tiempo de secado de café (Coffea arábica L.) en dos tipos de secadores solares en el valle de Sandia –Puno”. Los resultados obtenidos consistieron en que el equipo secador solar con colector alcanzó una temperatura de 51 °C y se redujo la humedad hasta en 12% en un tiempo de 3 días, además se comparó los atributos y propiedades del café donde la muestra 1 obtuvo un puntaje de 8.58 catalogado como excelente frente a la muestra 2 cuyo secador no tenía colector solar alcanzando solo 8.00., para el caso del secador de arándanos se alcanzó una temperatura de 38°C en cabina y 49.6 °C a diferencia del café su textura es de cascara gruesa y de densidad muy elevada alrededor de 620 kg/m³ mientras que la densidad del arándano .
- Según Ángeles, D. (2007). En su tesis titulada” Diseño y construcción de un secador solar”,. Los resultados indican que se hizo correctamente la secuencia de cálculo del secador, además el diseño produjo un tiempo se secado de 11.3 h para zanahorias y nopal, además el secador diseñado tiene un área de 12 m², con una capacidad de secado de 95 Kg de nopal, sin embargo para el caso propio el área efectiva de

secado se basó en 3.16 m^2 para captar la radiación solar $I = 725, 23 \text{ w/m}^2$, tomado de las mediciones de Acero Roncal como referencia de irradiación debido a la cercanía del lugar además respecto al área de secado Ángeles utiliza 12 m^2 mientras que en el presente estudio se usa la cuarta parte por ser un equipo de experimentación para una muestra de 2.5 kg .

- De la Torre, J y Portilla, M (2015). En su tesis titulada “Diseño y construcción de un prototipo de secador solar para el Capsicum Annum (Ají) con colector-almacenador de lecho en rocas con una capacidad de 25 Kg , obtuvo como resultados de la investigación que la humedad inicial del ají es del 87% y respecto del valor deseable para su humedad final corresponde entre 8 a 10% , el tiempo mínimo de secado es de 33 horas empleando una energía de $63\ 145.3 \text{ kJ}$, asimismo para el caso del arándano que tiene una humedad inicial alrededor de 92% y se reduce hasta valores de 30% en promedio.

Sanchez, L. (2021), en su tesis. Actividad de agua de arándanos deshidratados por método combinados osmosis-aire caliente, tuvo como objetivo determinar la actividad de agua de arándanos deshidratados por osmosis y secado con aire caliente, el método de investigación consistió en el experimental completo aleatorio de dos factores y en tres niveles para cada uno de los factores. a deshidratación osmótica se trabajó con un agente osmótico de $55, 60$ y 65 °brix de concentración y a $45, 60$ y 65 °C de temperatura del agente osmótico, y durante un tiempo de cinco horas, luego se sometió a un secado con aire caliente, para su posterior medida de la actividad de agua. A 45°C , a 60 y 65°brix se logró mayor pérdida de humedad ($3.945 \text{ Kg agua/Kg ss}$). Los valores óptimos en el proceso de deshidratación osmótica fueron a $52,5$ °C y a 60 °brix de agente osmótico, logrando una ganancia de sólidos solubles de 22.10 y la pérdida de humedad de 3.733 (Kg agua/Kg ss), y lograr un producto final de $24,325$ de grados °brix de producto final. . En el proceso de secado por aire caliente la concentración y la temperatura del agente osmótico influyen directamente en la pérdida de humedad, a 50 °C y 65 °brix se produce mayor pérdida de humedad aproximadamente 1.87 (Kg agua/Kg ss), para el experimento se alcanzó ratios de flux de secado de 5.75 g/hm^2 , 6.56 g/hm^2 , 4.92 g/hm^2 y 9.43 g/hm^2 respectivamente

6. Conclusiones

- La cantidad de calor absorbido por el sistema de secado equivale a 297.823 kJ con una irradiación solar promedio mensual para el año 2023 con radiación solar promedio mensual de 6760.535 Wh/m²
- La configuración y dimensiones del área del absorbedor solar circular para almacenamiento térmico tiene una era efectiva de 3.16 m², una altura total de 1.75 m y un radio de absorbedor de 0.60 m, la bandeja está instalada a 1.5m metros de altura de la base y tiene un ancho de 0.75m y de largo 0.65m, el volumen efectivo de secado de la cámara es de 1.89 m³, la pendiente de inclinación de la cubierta es de 45°.
- La velocidad del aire en promedio es de 0.52 m/s, el flujo másico de aire caliente y el calor absorbido es de 297.823 kJ y la humedad final para cada muestra corresponde a muestra 1, 29.4%, muestra 2, 225.3%, muestra 3, 29.9%, muestra 4, 31.8% y muestra 5, 31.1%.
- La eficiencia de secado para cada muestra equivale a 77.5%, 66.9%, 79%, 81.1 % y 81.9% respectivamente, la eficiencia promedio de secado es 77.28 %

7. Recomendaciones

- Para mejorar la absorción del calor respecto a la cubierta se debe experimentar con un ángulo menor a 45°.
- Para mayor capacidad de secado se debe incrementar el radio del absorbedor circular hasta 20% para conseguir 30% más de masa de secado en las mismas dimensiones de la cabina.
- Utilizar muestras de arándanos del mismo volumen o radio a fin de obtener uniformidad en el proceso de secado.
- Controlar la entrada de aire y la salida a fin de que haya recirculación en la cabina y evitar la condensación, la velocidad recomendada es de 0.4 a 1.2 m/s para ingreso de aire frío y de salida de aire caliente hasta 1.6m/s.
- Utilizar rebordes de Tecnopor en las juntas de entrada para las bandejas.
- Instalar un sistema de medición con sistema arduino para controlar a tiempo permanente el proceso de secado.
- Utilizar un acabado de pintura en negro mate opaco en el absorbedor para incrementar su absortividad.
- Utilizar bandejas de malla de menor espacio de celda a fin de mejorar la transferencia de calor por conducción.

8. Referencias bibliográficas

Holman, J.P. (1999). Transferencia de calor. Mc Graw Hill, 10ª ed. ISBN: 968-26-0649-7.

Moran, MJ, Shapiro, HN, Boettner, DD y Bailey, MB (2010). *Fundamentos de la termodinámica de la ingeniería* . John Wiley & Sons.

Vivar Samanamu, E. J., & Prado Bocanegra, R. A. (2014). Estudio energético de los colectores solares para el calentamiento de agua en el servicio hotelero, Chimbote-Perú.

Bijsterveld W.T.V., Houben L.J.M., Scarpas A., Molenaar A.A.A. (2001). Using pavement as solar collector: effect on pavement temperature and structural response. Journal of the Transportation Research Board; 1778: 140-148

Hassn A., Chiarelli A., Dawson A., Garcia A. (2016a). Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions. Materials & Design; 91: 432-439.

Hassn A., Aboufoul M., Wu Y., Dawson A., Garcia A. (2016b). Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures. Construction and Building Materials; 115: 327-335

Infante, A. S. F., Lozano, F. A. R., Barrera, D. H., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 5-15.

Rolando Franco, F. E. (2012). Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión.

9. Anexos

Índice de anexos:

Anexos 1 Carta psicrométrica

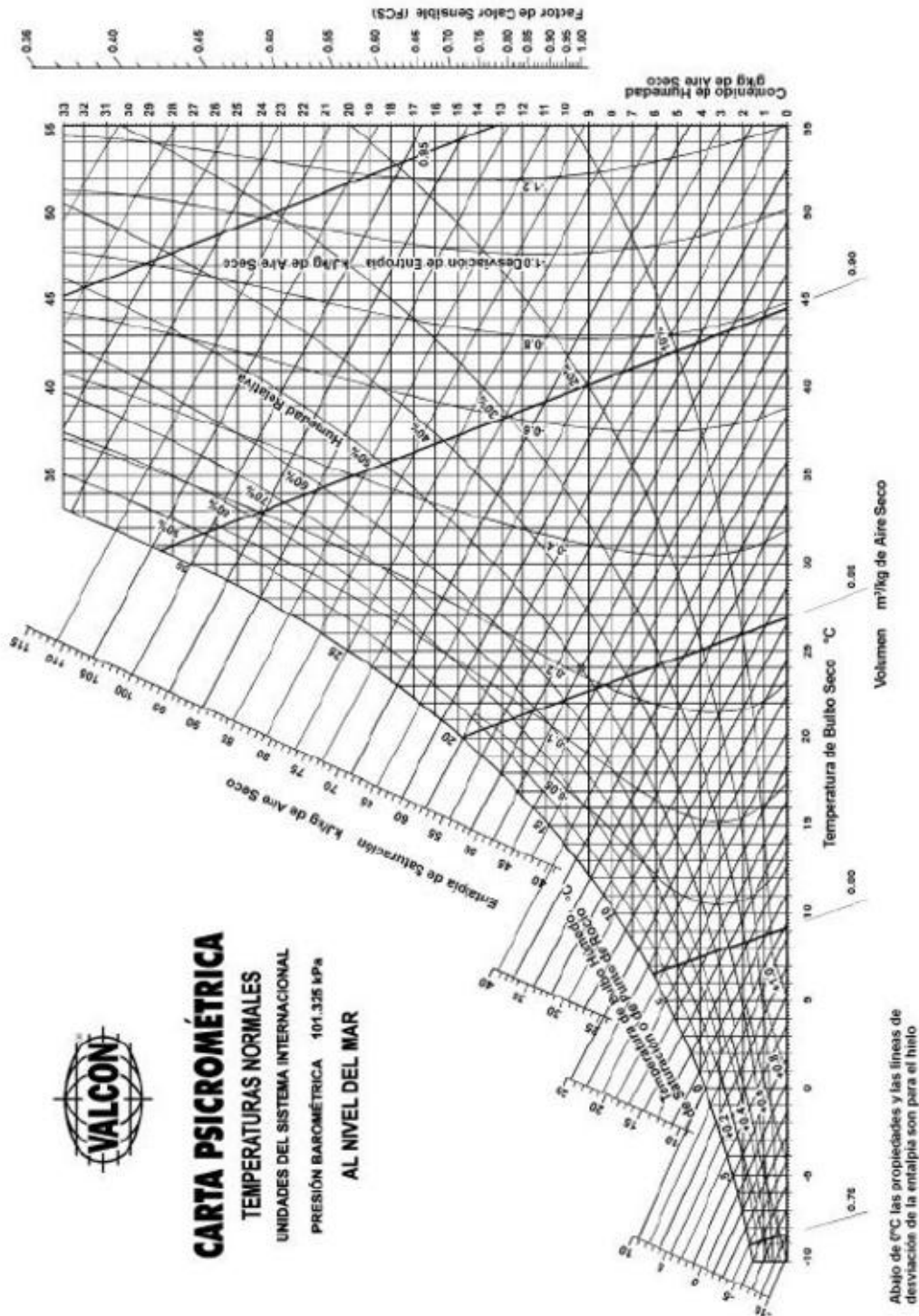
Anexo 2. Datos de tabla psicrométrica

Anexo 3. Conductividad térmica de materiales

Anexo 4. Radiación solar, información tomada de Acero Roncal, 2023)

Anexos 5. Registros fotográficos

ANEXO 1. Carta psicrométrica



ANEXO 2. Datos de tabla psicrométrica

Tabla psicrométrica										
Temperatura de un termómetro seco	Diferencia de temperatura entre los termómetros seco y húmedo (en °C) (El valor de la lectura medida especifica la humedad relativa en %)									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	82	64	47	31	14				
1	100	83	66	60	34	18				
2	100	84	68	52	37	22				
3	100	84	69	54	40	25	12			
4	100	85	70	56	42	28	18			
5	100	86	72	58	45	32	19	7		
6	100	86	73	60	47	35	23	11		
7	100	87	75	61	49	37	26	14		
8	100	87	75	62	51	40	29	18	7	
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11	
10	100	88	77	65	55	44	34	24	14	5
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17
15	100	90	80	71	61	53	44	36	27	20
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22
17	100	90	81	72	63	56	47	39	32	24
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27
19	100	91	82	74	65	58	50	43	36	29
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	31
21	100	91	83	75	67	60	52	45	39	32
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34
23	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36
24	100	92	84	77	70	62	56	49	43	37
25	100	92	85	77	70	63	57	51	44	39
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40
27	100	93	85	78	71	65	59	53	47	41
28	100	93	86	79	72	65	59	53	48	42
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44

ANEXO 3. Conductividad térmica de materiales

		λ	ρ	C_p	a	b
	Material	W/mK	kg/m ³	J/kgK	m ² /s	J/m ² K's
1	Poliuretano	0,026	30	1400	6,19E-7	3,30E+1
2	Aire	0,026	1,223	1063	2,02E-5	5,85E+0
3	Poliestireno	0,035	50	1675	4,18E-7	5,41E+1
4	Espuma fenólica	0,038	30	1400	9,05E-7	3,99E+1
5	Lana de vidrio	0,041	200	656	3,13E-7	7,33E+1
6	Corcho comprimido	0,085	540	2000	7,87E-8	3,03E+2
7	Mortero de cemento	0,090	1920	669	7,01E-8	3,40E+2
8	Madera de construcción	0,130	630	1360	1,52E-7	3,34E+2
9	Madera de pino	0,148	640	2512	9,19E-8	4,87E+2
10	Madera pesada	0,200	700	1250	2,29E-7	4,18E+2
11	Concreto celular	0,220	600	880	4,17E-7	3,41E+2
12	Tierra con paja	0,300	400	900	8,33E-7	3,29E+2
13	Concreto celular	0,330	800	880	4,69E-7	4,82E+2
14	Yeso	0,488	1440	837	4,05E-7	7,67E+2
15	Mortero cemento/arena	0,530	1570	1000	3,38E-7	9,12E+2
16	Agua	0,582	1000	4187	1,39E-7	1,56E+3
17	Ladrillos de arcilla	0,814	1800	921	4,91E-7	1,16E+3
18	Tierra muro portante	0,850	2000	900	4,72E-7	1,24E+3
19	Vidrio plano	1,160	2490	830	5,61E-7	1,55E+3
20	Arcilla	1,279	1460	879	9,97E-7	1,28E+3
21	Piedra arenisca	1,300	2000	712	9,13E-7	1,36E+3
22	Concreto pesado	1,750	2300	920	8,27E-7	1,92E+3
23	Piedra	1,861	2250	712	1,16E-6	1,73E+3
24	Mármol	2,900	2590	800	1,40E-6	2,45E+3
25	Granito	3,500	2500	754	1,86E-6	2,57E+3
26	Acero	50	7800	512	1,25E-5	1,41E+4
27	Aluminio	160	2800	896	6,38E-5	2,00E+4
28	Cobre	389	8900	385	1,13E-4	3,65E+4
	Máx	389,000	8900	4187	1,13E-4	3,65E+4
	Mín	0,026	1	385	7,01E-8	5,85E+0
	Rango	388,974	8899	3802	1,13E-4	3,65E+4

Anexo 4.Radiación solar, información tomada de Acero Roncal, 2023)

AÑO	1	2	3	4	5	6	8	9	J O	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MESES	Em (kWh/mes)																		
ENE	378.05	375.74	373.45	371.17	368.91	366.66	362.20	359.99	357.76	355.90	353.94	351.99	350.06	348.13	346.22	J.44,31	342.42	340.54	338.66
FEB	353.33	351.18	349.04	346.91	344.79	342.69	338.52	336.45	33-4,37	332.63	330.80	328.98	327.17	325.37	323.58	321.80	320.03	318.27	316.52
MAR	41 1,25	408.75	406.25	403.77	401.31	398.86	394.01	391.61	389.18	387.16	385.03	382.91	380.80	378.71	376.63	374.55	372.49	370.45	368.41
ABR	365.17	362.94	360.72	358.52	356.34	354.16	349.85	347.72	345.56	343.77	341.88	340.00	338.13	336.27	334.42	332.58	330.75	328.93	327.12
MAY	378.97	376.66	374.36	372.08	369.81	367.55	363.08	360.87	358.63	356.76	354.80	352.85	350.91	348.98	347.06	J.45,15	343.25	341.37	339.49
.IUN	320.58	318.62	316.68	314.74	312.82	310.92	307.14	305.26	303.37	301.79	300.13	298.48	296.84	295.21	293.58	291.97	290.36	288.77	287, 18
.IUL	301.91	300.07	298.24	296.42	294.61	292.81	289.25	287.48	285.70	284.22	282.65	281.10	279.55	278.02	276.49	274.97	273.45	271.95	270.45
AGO	350.73	348.59	346.46	344.35	342.25	340.16	336.03	333.98	331.91	330.18	328.36	326.56	324.76	322.98	321.20	319.43	317.68	315.93	314.19
sE-r	329.81	327.79	325.79	323.81	321.83	319.87	315.98	314.05	312.10	310.48	308.77	307.08	305.39	303.71	302.04	300.38	298.72	297.08	295.45
OC-T	367.24	365.00	362.77	360.56	358.36	356.18	351.84	349.70	347.53	345.72	343.82	341.93	340.05	338.18	336.32	334.47	332.63	330.80	328.98
NOV	362.27	360.06	357.86	355.68	353.51	351.35	347.08	344.96	342.82	341.04	339.16	337.30	335.44	333.60	331.76	329.94	328.13	326.32	324.53
DIC	347.81	345.69	343.58	341.48	339.40	337.33	333.23	331.20	329.14	327.43	325.63	323.84	322.06	320.29	318.53	316.77	315.03	313.30	311.58
Ea (kWh/año)	4267,t t	424 ,08	4215,2	489,SO	4 163,94	4 138,54	4088,2 1	4063.27	4038.08	40 17,08	3994.99	3973.01	3951.16	3929.43	3907.82	3886.33	3864.95	3843.69	3822.55

ANEXOS 5. Registros fotográficos

Figura a. Etapa constructiva del absorbedor circular



Figura b. Instalación de base trapezoidal



Figura c.

Construcción de marco de bandeja de secado



Figura d

Construcción de cabina de secado para 01 bandeja



Figura e
construcción de la cabina de secado con una bandeja



Figura f
Unión de absorbedor y cabina de secado

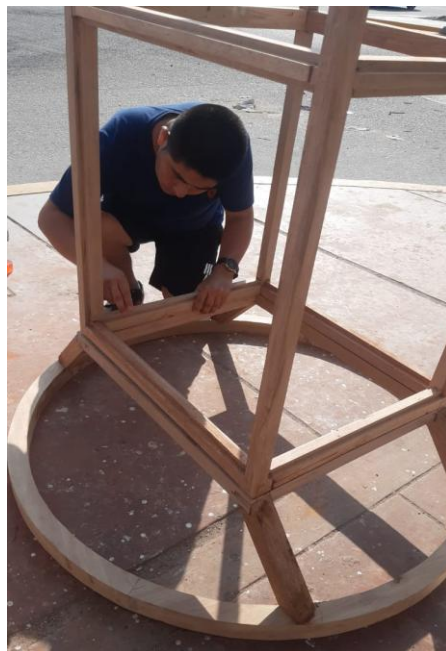


Figura g

Secador con absorbedor circular y cabina de secado de una bandeja



Figura h

Compartimento de regulación de flujo de aire caliente



Figura i

Equipo completo de secador solar



Figura j

Medición de radiación (se contrastó con cita de autor Acero Roncal)



Figura k

Medición de la velocidad de viento en la superficie

